



João José Malheiro Gonçalves Pereira

Bases de trabalho para a avaliação do ciclo de vida de vigas em betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

João José Malheiro Gonçalves Pereira

Bases de trabalho para a avaliação do  
ciclo de vida de vigas em betão armado  
reforçadas com laminados de CFRP de  
acordo com as técnicas EBR e NSM

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz

## DECLARAÇÃO

Nome: João José Malheiro Gonçalves Pereira

Endereço eletrónico: jojomagope@hotmail.com

Telefone: 965410547

Número do Bilhete de Identidade: 13952764

Título dissertação /tese

Bases de trabalho para a avaliação do ciclo de vida de vigas em betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM

Orientador:

Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## **Agradecimentos**

No culminar desta dissertação, desejo manifestar o meu mais sincero reconhecimento às pessoas que contribuíram para que a realização dos objetivos pretendidos fossem alcançados.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao professor José Manuel de Sena Cruz, por todo o conhecimento que me transmitiu, por todos as sugestões e conselhos dados, e pela boa disposição com que sempre me ouviu.

Agradeço aos meus amigos, especialmente ao Rui, ao Siro e ao David, que de uma forma ou de outra, me incentivaram e me apoiaram nas fases mais difíceis no decorrer deste percurso.

Por fim agradeço aos meus pais e irmãos, por todo o incentivo e força que me transmitiram ao longo desta grande etapa da minha vida.

Esta dissertação é apoiada pela FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012.

Em memória às minhas avós,  
Leonor e Venância



## Resumo

A indústria da construção civil é responsável por uma grande quantidade e diversidade de impactos ambientais causados no meio ambiente resultantes do consumo excessivo de matérias-primas e da acumulação inadequada de resíduos. Portanto, torna-se necessário criar estratégias para desenvolver técnicas de construção ambientalmente mais sustentáveis.

Neste contexto, com o propósito de garantir um futuro mais sustentável surgiu uma ferramenta, comumente designada por análise do ciclo de vida (ACV), que permite avaliar e quantificar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida (berço ao túmulo) de um produto, processo ou atividade.

O objetivo primordial da presente dissertação era realizar uma análise do ciclo de vida comparando técnicas de reforço tradicionais com as técnicas de reforço EBR (Externally Bonded Reinforcement) e NSM (Near Surface Mounted) com recurso a laminados de CFRP. Devido à dificuldade na obtenção de dados referente à ACV dos processos de reforço com laminados de CFRP ao longo do seu ciclo de vida, não foi possível efetuar esta comparação. Contudo, foi criada a base de trabalho para a ACV de distintas técnicas de reforço (técnicas tradicionais, EBR, NSM), através do dimensionamento de reforço à flexão de uma viga. Complementarmente neste trabalho, também se procedeu com a apresentação e análise de dois casos de estudos sobre a aplicação da ferramenta de análise do ciclo de vida em atividades no setor da construção civil.

Numa fase inicial da presente dissertação foram descritas técnicas de reforço com recurso a polímeros reforçados com fibras (FRP) e técnicas de reforço tradicionais. Depois fez-se uma apresentação metodológica da ferramenta ACV de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044. De modo a garantir uma base de dados para futuros trabalhos, foram efetuados cálculos de reforço à flexão de uma viga tipo segundo as recomendações do *American Concrete Institute (ACI)* e da norma italiana CNR. Numa fase final foram apresentados dois casos de estudo onde, através da ACV de ambos, foi possível verificar a superior eficiência que os materiais compósitos trazem quando comparados com materiais tradicionais em termos de impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida.

Palavras-chave: ACV, EBR, NSM, ACI, CNR.



## **Abstract**

The building industry is responsible for a large amount and diversity of environmental impacts caused in the environment resulting from excessive consumption of raw materials and inadequate accumulation of waste. Therefore, it is necessary to develop strategies to develop more environmentally sustainable building techniques.

In this context, in order to ensure a more sustainable future a new tool, has been proposed: the life-cycle assessment (LCA), which allows to assess and quantify the environmental impacts associated with the life cycle (cradle to grave) of a product, process or activity.

The primary objective of this dissertation was to conduct a life-cycle assessment comparing traditional reinforcement techniques with reinforcement techniques EBR (Externally Bonded Reinforcement) and NSM (Near Surface Mounted) using CFRP laminates. Because of the difficulties faced in obtaining data regarding the LCA of reinforcing processes with CFRP laminates throughout their life cycle, it wasn't possible to make this comparison. However, it was established the bases for the LCA of various reinforcement techniques (traditional techniques, EBR, NSM) by designing beam strengthened in flexural. Additionally, with the present dissertation includes two case studies on the application of LCA activities in the construction sector.

In the present work the reinforcement techniques using fiber reinforced polymer (FRP) and reinforcement traditional techniques were described. Then the LCA tool in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards were presented. To ensure a database for future works, strengthening calculations a beam in flexural according to the recommendations of the American Concrete Institute (ACI) and the National Research Council (CNR) were carried out. In the final phase to the present work, two LCA case studies were presented where, showing the superior efficiency that composites materials bring when compared to traditional materials in terms of environmental impacts throughout their life cycle.

Keywords: LCA, EBR, NSM, ACI, CNR.



# Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Índice.....	ix
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Tabelas.....	xvii
1 Introdução, objetivos e estrutura da dissertação.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2 Reforço estrutural.....	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Materiais compósitos.....	6
2.2.1 Conceitos históricos.....	6
2.2.2 Definição.....	6
2.2.3 Polímero reforçado com fibras.....	7
2.2.3.1 Matriz.....	9
2.2.3.2 Fibras.....	12
2.2.4 Processos de produção.....	16
2.2.5 Sistemas de reforço.....	17
2.2.6 Técnicas de reforço à flexão.....	19
2.2.6.1 Encamisamento com adição de betão armado.....	19
2.2.6.2 Técnica EBR.....	22
2.2.6.3 Técnica NSM.....	24
3 Análise do ciclo de vida.....	27
3.1 Considerações gerais.....	27
3.2 Conceitos históricos e normalizações.....	29
3.3 Metodologia da ACV.....	31
3.3.1 Definição do objetivo e âmbito.....	32
3.3.1.1 Objetivo do estudo.....	32

3.3.1.2	Âmbito do estudo .....	32
3.3.2	Análise do inventário do ciclo de vida .....	34
3.3.3	Avaliação do impacto do ciclo de vida .....	35
3.3.4	Interpretação.....	38
3.4	Vantagens e limitações de um estudo ACV.....	39
4	Reforço à flexão de uma viga de betão armado .....	43
4.1	Considerações iniciais .....	43
4.2	Apresentação do problema.....	43
4.3	Reforço com recurso à solução de encamisamento parcial com adição de betão armado .....	45
4.4	Reforço à flexão com recurso à técnica EBR .....	47
4.4.1	Recomendações ACI 440.2R-08 (2008).....	47
4.4.2	Recomendações CNR-DT 200 (2004) .....	60
4.5	Reforço à flexão com recurso à técnica NSM .....	67
4.6	Análise comparativa .....	75
5	Casos de estudo.....	79
5.1	Introdução .....	79
5.2	Caso de estudo I - Análise do ciclo de vida de técnicas de reforço de vigas de betão armado .....	79
5.2.1	Descrição geral .....	79
5.2.2	Fronteiras do sistema, fluxo elementar e recolha de dados.....	80
5.2.2.1	Reforço com encamisamento de chapas metálicas .....	81
5.2.2.2	Reforço com CFRP .....	82
5.2.2.3	Transportes.....	83
5.2.3	Unidade funcional .....	83
5.2.4	Avaliação do impacto do ciclo de vida .....	84
5.2.5	Qualidade dos dados .....	87
5.2.6	Conclusão.....	88
5.3	Caso de estudo II - Análise do ciclo de vida relativo à comparação de dois sistemas de tanques para aquários (FRP vs. betão) .....	89
5.3.1	Descrição geral .....	89
5.3.2	Processos para a execução do tanque em FRP e em betão armado .....	89
5.3.3	Métodos de ACV, fronteiras do sistema, categorias de impacto e recursos de dados....	92
5.3.4	Análise do custo do ciclo de vida (ACCV).....	94

---

5.3.5 Fases de avaliação do impacto ambiental .....	95
5.3.5.1 Fase de produção dos materiais .....	95
5.3.5.2 Fase de transporte e de construção .....	97
5.3.5.3 Fase de fim de vida .....	99
5.3.6 Avaliação dos impactos totais .....	101
5.3.7 Recomendações .....	104
6 Conclusões .....	107
6.1 Considerações finais .....	107
6.2 Desenvolvimentos futuros .....	108
Referências Bibliográficas .....	111
Anexos .....	119



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Constituição de um compósito (adaptado de ACI, 1996) .....	7
Figura 2.2 - Comparação de algumas propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (reproduzido de Juvandes, 1999).....	8
Figura 2.3 - Relação tensão vs extensão dos componentes de um compósito e do compósito que as constituem (adaptado de Potyrala, 2011).....	9
Figura 2.4 - Diagrama das curvas tensão vs. deformação dos principais tipos de resinas quando submetidos a uma temperatura de 80°C durante cinco horas na sua cura (reproduzido de Juvandes, 1996a).....	12
Figura 2.5 - Aspeto visual de diferentes tipos de fibra: a) Fibra de Carbono b) Fibra de Vidro c) Fibra de Aramida (adaptado de Sousa, 2008).....	13
Figura 2.6 - Comparação de um fio de cabelo com uma fibra de carbono (wikipédia, 2012) .....	13
Figura 2.7 - Relação tensão vs. extensão do aço e de vários tipos de fibras (adaptado de Matthys, 2000) .....	15
Figura 2.8 - Produção de FRP através do processo de pultrusão (reproduzido de Beber, 2003).....	16
Figura 2.9 - Aplicação de FRP através da técnica de moldagem por contato (adaptado de Silva, 2014) .....	16
Figura 2.10 - Produção de FRP por enrolamento filamentar (adaptado de Garcez, 2007) .....	17
Figura 2.11 - Orientação das fibras (adaptado de Juvandes, 2011).....	17
Figura 2.12 - Laminados de FRP (reproduzido de Rodrigues, 2005).....	19
Figura 2.13 - Viga com reforço à flexão (reproduzido de Appleton e Gomes, 2007) .....	20
Figura 2.14 - Tipos de preparação de superfície (adaptado de Appleton e Gomes, 2007) .....	21
Figura 2.15 - Espessura a betonar de acordo com o tipo de material (adaptado de Appleton e Gomes, 2007).....	21
Figura 2.16 - Aplicação da técnica EBR com sistemas de reforço de CFRP (adaptado de Dias, 2008) .....	22
Figura 2.17 - Organograma do processo de aplicação da técnica EBR (adaptado de Dias, 2008) .....	23
Figura 2.18 - Procedimento de aplicação de laminados de CFRP segundo a técnica NSM (adaptado de Dias, 2008) .....	24
Figura 2.19 - Organograma do processo de aplicação da técnica NSM (adaptado de Dias, 2008) .....	25
Figura 3.1 - Ciclo de vida de um produto e as suas entradas/saídas (adaptado de Joshi et al., 2012) .....	29
Figura 3.2 - Metodologia de uma ACV (adaptado de ISO 14040, 1997) .....	32
Figura 3.3 - Fase do inventário do ciclo de vida (adaptado de Lippiatt, 2002).....	35

Figura 3.4 - Elementos constituintes da fase AICV (adaptado de Ferrão, 2004) .....	36
Figura 3.5 - Conceito de indicador de categoria (adaptado de Iso 14044, 2006) .....	38
Figura 3.6 - Relação entre as fases de um estudo ACV (adaptado de ISO 14044, 2008) .....	39
Figura 4.1 - Modelo da viga tipo em estudo .....	44
Figura 4.2 - Representação da viga tipo reforçada com a técnica de encamisamento de betão (C25/30) .....	45
Figura 4.3 - Distribuição de tensões e extensões numa seção (adaptado de ACI 440.2r-02,2002).....	51
Figura 4.4 - Geometria da viga tipo em estudo (adaptado de Cruz et al., 2011) .....	52
Figura 4.5 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP .....	58
Figura 4.6 - Modos de rotura para elementos de betão reforçados com FRP (CNR 2004).....	62
Figura 4.7 - Esquema de uma seção transversal reforçada com FRP e os seus diagramas de extensão e equilíbrio de forças (adaptado de CNR,2004) .....	64
Figura 4.8 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP.....	66
Figura 4.9 - Geometria da viga tipo em estudo (adaptado de Cruz et al., 2011) .....	68
Figura 4.10 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP.....	74
Figura 4.11 - Dimensão mínima das ranhuras (adaptado de ACI, 2008) .....	75
Figura 5.1 - Ponte rodoviária típica dos U.S.A (reproduzido de Zhou, 2013) .....	80
Figura 5.2 - Fluxograma da ACV dos sistemas de reforço (adaptado de Zhou, 2013).....	81
Figura 5.3 - Fluxograma da ACV do sistema de reforço com adição de chapas metálicas (adaptado de Zhou, 2013) .....	81
Figura 5.4 - Fluxograma da ACV do sistema de reforço com CFRP (adaptado de Zhou, 2013) .....	82
Figura 5.5 - Sistema de reforço com CFRP (reproduzido de Zhou, 2013) .....	84
Figura 5.6 - Caracterização das duas técnicas de reforço aplicadas neste estudo (adaptado de Zhou, 2013).....	85
Figura 5.7 - Contribuição de cada fase para o impacto global da técnica de reforço tradicional (adaptado de Zhou, 2013) .....	87
Figura 5.8 - Contribuição de cada fase para o impacto global da técnica de reforço com CFRP (adaptado de Zhou, 2013) .....	87
Figura 5.9 - Fluxograma do ciclo de vida do tanque em betão armado (adaptado de Fekka et al., 2008) .....	90
Figura 5.10 - Modelo 3D do tanque em betão armado (adaptado de Fekka et al., 2008) .....	91
Figura 5.11 - Modelo 3D do tanque em FRP (adaptado de Fekka et al., 2008).....	91

Figura 5.12 - Fluxograma do ciclo de vida do tanque em FRP (adaptado de Fekka et al., 2008) .....	92
Figura 5.13 - Impactos ambientais da fase de produção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008).....	96
Figura 5.14 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de produção (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	96
Figura 5.15 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de transporte e construção (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	97
Figura 5.16 - Impactos ambientais da fase de transporte e construção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	98
Figura 5.17 - Impactos ambientais da fase de transporte e construção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	100
Figura 5.18 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de fim de vida (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	101
Figura 5.19 - Total de impactos ambientais no ciclo de vida de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	103
Figura 5.20 - Comparação da percentagem do total de impactos ambientais no ciclo de vida dos sistemas (reproduzido de Fekka et al., 2008) .....	104



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais propriedades dos tipos de resinas termoendurecíveis mais comuns para o reforço estrutural (adaptado de Matthys, 2000) .....	11
Tabela 2.2 - Propriedades típicas de algumas fibras (adaptado de Matthys, 2000) .....	15
Tabela 2.3 - Descrição das mantas e dos tecidos utilizados nos sistemas curados “in situ” ( adaptado de Juvandes, 1999) .....	18
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais constituintes da viga .....	44
Tabela 4.2 - Cargas atuantes na viga .....	44
Tabela 4.3 - Coeficiente de redução ambiental (adaptado de ACI 440.2R,2008) .....	48
Tabela 4.4 - Principais características da viga em estudo (adaptado de ACI, 2008) .....	52
Tabela 4.5 - Ações a que está sujeita a viga tipo e os seus momentos correspondentes (adaptado de ACI, 2008) .....	53
Tabela 4.6 - Características fundamentais do laminado de CFRP .....	53
Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (adaptado de ACI, 2008) .....	54
Tabela 4.8 - Coeficientes de parciais de segurança para os sistemas de FRP (adaptado de CNR,2004) .....	62
Tabela 4.9 - Principais características da viga em estudo .....	69
Tabela 4.10 - Ações a que está sujeita a viga tipo e os seus momentos correspondentes (adaptado de ACI, 2008) .....	69
Tabela 4.11 - Características fundamentais do laminado de CFRP (adaptado de ACI, 2008) .....	70
Tabela 4.12 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica NSM (adaptado de ACI, 2008) .....	70
Tabela 4.13 - Principais características das técnicas usadas para o reforço da viga tipo em estudo....	77
Tabela 5.1 - Resultados das duas técnicas de reforço utilizadas neste estudo (adaptado de Zhou, 2013) .....	86
Tabela 5.2 - Emissões e categorias de impacto ambiental (adaptado de Fekka et al., 2008) .....	93
Tabela 5.3 - Preços associados aos dois tanques em análise (adaptado de Fekka et al., 2008) .....	94
Tabela 5.4 - Valores das diversas categorias de impacto associadas ao ciclo de vida dos sistemas em análise (adaptado de Fekka et al., 2008).....	101



# **Capítulo 1**

## **INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

### **1.1 Introdução**

A indústria da Construção Civil, de acordo com o CIB (Conselho Internacional de Pesquisa e Inovação na Construção), necessita de grandes quantidades de energia, gera grandes quantidades de resíduos e é o setor de atividades humanas que consome um maior número de recursos naturais, provocando uma grande gama de impactos ambientais, sociais e económicos.

Globalmente, estima-se que este setor de atividades seja responsável pelo consumo de 40% do valor total da energia, 25% dos recursos hídricos, 40% dos recursos naturais e emite aproximadamente 33% dos gases de efeito estufa (Bragança, 2013). Na União Europeia, esta indústria corresponde a cerca de 40% dos consumos energéticos e dos resíduos provocados pelo homem (CIB, 1999).

Neste contexto, para minimizar os impactos anteriormente referidos, surge a necessidade de aplicação do conceito de sustentabilidade ao setor da construção. De acordo com o relatório Brundtland (1987) o “Desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades”. Com isto pretende-se salvaguardar a saúde e o bem-estar dos habitantes, a utilização racional dos recursos existentes e a potenciação do bom desempenho dos ecossistemas (Silva, 2011/2012).

Surgiu então o conceito de construção sustentável, que segundo o Charles Kibert (1994) é a "criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos".

O reforço estrutural é uma solução que tem vindo a ser desenvolvida com o propósito de minimizar os efeitos que o sector da construção provoca ao nível do consumo de recursos naturais, de água e energia, garantindo assim, uma construção sustentável. Deste modo, o estudo desta prática assume um papel fulcral para a comunidade técnica que, como agente de desenvolvimento, é responsável pela procura de sistemas mais eficientes, duráveis e sustentáveis (Carvalho, 2010).

Na procura de soluções que potencializassem estes fatores, surgiu um novo sistema que consiste na aplicação de polímeros reforçados com fibras (*fiber reinforced polymer* - FRP) no reforço de estruturas. O uso correto dos FRP, devido à sua elevada resistência à tração e rigidez, bom comportamento à fadiga, baixo peso, imunidade à corrosão e à sua diversidade geométrica são uma ótima alternativa aos sistemas tradicionais de reforço, tais como, o uso de chapas metálicas e o encamisamento em betão armado. As principais técnicas para a aplicação de FRP no reforço estrutural, consistem na colagem externa de mantas ou faixas de laminado (*Externally Bonded Reinforcement* – EBR) e na introdução de laminados ou varões na zona de recobrimento do betão (*Near-Surface Mounted* – NSM) do elemento estrutural a reforçar (Coelho et al., 2011).

Apesar de cumprirem o mesmo propósito, estas técnicas diferem na eficiência e nos impactos que causam no meio ambiente. De forma a possibilitar uma análise comparativa destes diferentes métodos de reforço e determinar qual deles é o mais competente, torna-se necessário a utilização de uma ferramenta normalizada que permita quantificar e analisar de forma sistemática os fluxos de energia e de matérias-primas utilizadas.

Neste contexto, surgiu a análise do ciclo de vida (ACV) que foi definida pela *Society for Environmental Toxicology and Chemistry*, como um processo para avaliar as implicações ambientais de um produto, processo ou atividade, através da identificação e quantificação dos usos de energia e matéria e das emissões, e identificar e avaliar oportunidades de realizar melhorias ambientais (SETAC, 1991).

A ACV é uma ferramenta que tem sido constantemente aperfeiçoada e atualmente normalizada pela série de normas ISO 14040 e ISO 14044 (2006). Segundo estas, a ACV é uma técnica que tem vindo a ser desenvolvida com o intuito de aumentar a sensibilização sobre a importância da proteção do ambiente e os impactos ambientais ao longo da vida de um produto, isto é, desde a sua aquisição até a produção, utilização, tratamento de fim de vida, reciclagem e disposição final.

## 1.2 Objetivos

Nos últimos anos o mercado do reforço estrutural tem vindo a impor-se em virtude da existência de um vasto património edificado. Existem distintas soluções para o reforço estrutural para o caso das estruturas de betão armado, das quais se destacam as que recorrem a materiais do tipo FRP (*fiber reinforced polymer*), com recurso às técnicas EBR (Externally Bonded Reinforcement) e NSM (Near-Surface Mounted). Apesar das inúmeras vantagens que estas soluções apresentam, estudos do ciclo de vida demonstrando o seu real potencial ainda são escassos. Atualmente é crescente a preocupação social com as questões da sustentabilidade, sobretudo ambiental, procurando-se que as técnicas de construção e reforço produzam um impacto mínimo e quantificável no ambiente, sendo ao mesmo tempo economicamente viáveis.

Assim, os principais objetivos da presente dissertação são:

- Introduzir os conceitos gerais da temática da ferramenta de análise de ciclo de vida (ACV) em conformidade com a norma ISO 14040 e ISO 14044 (2006);
- Preparar uma base de dados com as metodologias de cálculo de reforço à flexão de uma viga de betão armado com sistemas de laminados CFRP em conformidade com as propostas de cálculo sugeridas pela norma ACI Committee 440 (2008) e CNR- Italian National Research Council (CNR-DT 200/2004), para no futuro se poder realizar uma ACV das mesmas;
- Coletar e detalhar casos de estudo afins à temática em análise.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos, os quais se descrevem em seguida.

No presente capítulo é feito um enquadramento do tema da dissertação, e conseqüentemente, são apresentados os objetivos e a estrutura desta dissertação.

No Capítulo 2 expõe-se uma breve introdução que procura explicar o recurso às técnicas de reforço estrutural. De seguida, faz-se uma descrição dos materiais compósitos, nomeadamente, os polímeros reforçados com fibras (FRP), apresentando-se as suas características gerais, a produção, os campos de aplicação e os tipos de reforço mais usados com a sua aplicação.

No Capítulo 3 apresenta-se uma breve descrição geral que explica a importância de aplicação da ferramenta ACV, acompanhada por uma descrição histórica e as suas normalizações, assim como, por uma abordagem metodológica e as suas principais vantagens e limitações.

No Capítulo 4 são exibidos os cálculos de reforço da viga tipo em estudo segundo as técnicas de reforço tradicional por encamisamento com adição de betão armado, a EBR e a NSM. Estes cálculos foram efetuados de acordo com as recomendações do American Concrete Institute (ACI) e da norma italiana CNR. No fim deste capítulo é feita uma breve análise comparativa entre as diferentes técnicas de reforço estudadas na presente dissertação.

No Capítulo 5 são apresentados dois casos de estudo com aplicação da ferramenta de análise de ciclo de vida a sistemas de reforço e de construção aplicados nas práticas de engenharia civil.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido de acordo com os objetivos delineados, a partir dos quais são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros.

## **Capítulo 2**

### **REFORÇO ESTRUTURAL**

#### **2.1 Considerações gerais**

O betão armado é o material de construção mais utilizado e que tem contribuído fortemente para o desenvolvimento económico a nível mundial desde a sua primeira utilização no final do século XIX (NP EN 1504-1, 2006). Isto deve-se às suas propriedades mecânicas, à sua facilidade de aplicação em obra e à constante desvalorização de outros materiais. No entanto, este material apresenta diversas desvantagens sendo então indispensável a sua manutenção ao longo da vida útil do elemento estrutural em que está integrado.

A falta de manutenção, a mudança de carregamentos, as deficiências de projeto, de execução e até mesmo dos materiais constituintes (Pivatto, 2014), são alguns dos fatores que levam à degradação das estruturas de betão armado, e conseqüentemente, afetam o aspeto, a segurança e a funcionalidade do elemento em causa, necessitando assim, de uma intervenção que seja capaz de atenuar estes impactos.

De acordo com Costa et al. (2009), o reforço estrutural é uma estratégia de intervenção que foi desenvolvida com o propósito de aumentar a capacidade de carga das estruturas de betão armado, da necessidade de alterações com a incorporação de novos elementos estruturais, e ainda pelo facto das estruturas não apresentarem condições para desempenhar corretamente as funções para as quais foram dimensionadas.

A economia de recursos naturais, a conservação do meio ambiente e a diminuição da poluição atmosférica são umas das principais vantagens do bom uso destas intervenções de reforço, contribuindo assim, para uma construção sustentável (Jalali, 2002).

Uma alternativa a soluções de reforço seria a demolição, construindo-se em seguida de novo, o que seria pouco viável ou até mesmo condicionado a nível arquitetónico e patrimonial.

Mantendo o interesse nas técnicas de reforço de elementos de betão armado, recentemente foram realizados diversos estudos para a obtenção de novos materiais e novas técnicas de reforço. Nos pontos que se seguem, apresenta-se uma análise detalhada de novos materiais e técnicas de reforço, referindo as suas principais características.

## **2.2 Materiais compósitos**

### **2.2.1 Conceitos históricos**

Os compósitos começaram a ser usados nas construções efetuadas pelas civilizações antigas (1500 a.c.). Estas usavam palha misturada com lama para formar um material de construção conhecido como adobe. A palha fornecia a estrutura e a resistência e a lama atuava como um ligante, garantindo assim a sua forma.

Desde os tempos do adobe, o uso de materiais compósitos evoluiu para incorporar, geralmente, uma fibra estrutural e um plástico, isto é conhecido como *Fiber Reinforced Plastics* (FRP). Tal como palha, fibra proporciona a estrutura e resistência ao compósito, enquanto um polímero de plástico mantém a fibra em conjunto.

### **2.2.2 Definição**

Um material compósito (Figura 2.1) é a combinação de dois ou mais materiais de naturezas diferentes para criar um material com desempenho superior aqueles que foram usados para a sua obtenção.

Estes são constituídos por uma fase contínua (matriz), por uma fase dispersa (fibras) e por uma interface, que é camada muito fina que assegura a transferência de esforços entre a matriz e as fibras, e é formada a partir das reações químicas e do processo de fabrico do compósito (CNR, 2004).

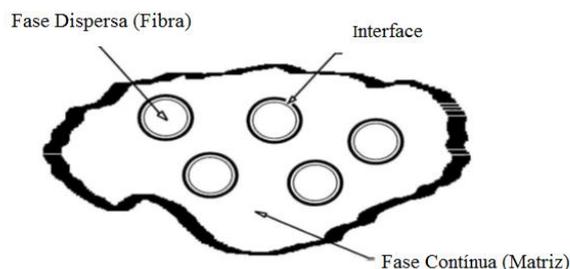


Figura 2.1 - Constituição de um compósito (adaptado de ACI, 1996)

### 2.2.3 Polímero reforçado com fibras

Os polímeros reforçados com fibras, conhecidos por *fiber reinforced polymer* (FRP) na literatura internacional, são constituídos, essencialmente, por fibras de elevada resistência impregnadas numa matriz polimérica (resina). Existe uma enorme variedade de resinas e fibras que podem ser utilizadas no fabrico de um material compósito. Geralmente a resina é constituída por um material com tenacidade e ductilidade superior e com resistência mecânica e rigidez inferior à das fibras (Silva, 2014).

Segundo Carneiro e Teixeira (2008), a escolha da resina mais apropriada depende do tipo de ambiente o qual o compósito estará submetido. Por outro lado, na escolha das fibras deve-se ter em conta a resistência, a rigidez e a durabilidade que é pretendida.

A elevada resistência à tração, à corrosão e à fadiga, o bom amortecimento ao choque e ao isolamento eletromagnético e o baixo peso específico são propriedades que fizeram com que o sector da engenharia civil ganhasse um especial interesse na aplicação destes materiais (Juvandes, 1999). Porém, o elevado custo dos FRP, quando comparados com os materiais tradicionais com a mesma finalidade, é considerado como uma das suas principais limitações. Sendo então necessário fazer uma análise detalhada do elemento a reforçar, verificando se é económico fazer o seu reforço com recurso a FRP. No entanto, é importante salientar que a aplicação destes materiais pode tornar-se competitiva a nível económico, mesmo quando comparada com as técnicas tradicionais, se considerarmos as intervenções que o elemento reforçado irá precisar durante a sua vida útil. Neste contexto, Meier (1995) afirma que, num reforço estrutural, os custos com materiais correspondem a aproximadamente 20% do custo total da obra, sendo o restante atribuído à mão-de-obra e custos indiretos, que por sua vez, podem ser diminuídos com a utilização de FRP devido às suas boas propriedades físicas e mecânicas, onde se destaca o seu baixo peso (Figura 2.2).

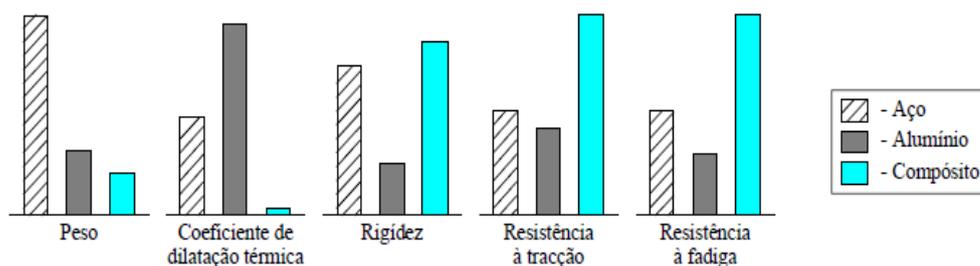


Figura 2.2 - Comparação de algumas propriedades entre o aço, o alumínio e o compósito (reproduzido de Juvandes, 1999)

O comportamento e as propriedades de um FRP dependem, principalmente, da natureza dos materiais que o constituem, da distribuição e do teor das fibras fundamentais do reforço, da interação destas componentes referidas e do processo de fabricação do produto final. A orientação, a composição, a forma, o comprimento das fibras, as propriedades mecânicas da resina da matriz, assim como a adesão entre as fibras e a matriz são os principais fatores intervenientes neste comportamento (Juvandes et al., 1996a).

As propriedades de um material compósito são conhecidas normalmente a partir das propriedades e características intrínsecas de cada componente que o constituem. A interação entre os componentes derivará num novo conjunto de propriedades, resultantes da combinação das propriedades individuais de cada componente. A ordem como estão distribuídos e a quantidade relativa de cada um, são fatores essenciais que contribuem para o desempenho do compósito. Devido a estes parâmetros os materiais compósitos são muito versáteis, podendo ser utilizados numa ampla variedade de aplicações (Beber, 2003).

Na Figura 2.3 pode-se observar a relação tensão vs. extensão das fibras, da matriz e do compósito que as constituem. Nota-se que a resistência mecânica das fibras é superior à do compósito em que está impregnado. Embora haja esta discrepância o material compósito apresenta propriedades mecânicas, físicas e funcionais superiores às dos seus constituintes (ACI, 1996). É importante salientar que na matriz há uma maior extensão de rotura do que nas fibras, para permitir que a mesma continue a possuir capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra ter atingido a sua tensão de rotura (limite de resistência).

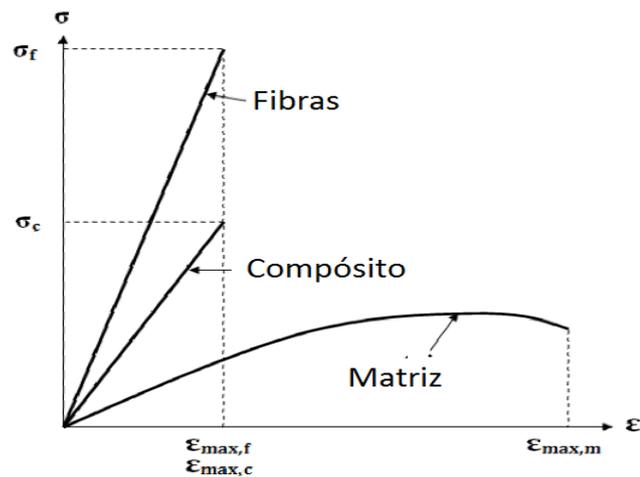


Figura 2.3 - Relação tensão vs extensão dos componentes de um compósito e do compósito que as constituem (adaptado de Potyrala, 2011)

### 2.2.3.1 Matriz

A matriz dos polímeros reforçados com fibras é constituída por uma fase contínua que envolve completamente a fase dispersa (fibras) e tem como funções, transmitir os esforços entre as fibras e a estrutura envolvente, proteger as fibras dos danos ambientais e mecânicos e fornecer o suporte transversal contra a instabilidade das fibras sob cargas de compressão (ACI, 1996).

De acordo com Silva (2014), nesta fase as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras e, embora seja apenas uma pequena percentagem, para a matriz. Esta é responsável pela proteção das fibras, protegendo-as contra a humidade, abrasão, oxidação e agentes agressivos, de natureza química ou biológica.

Conforme Hollaway (1993) a matriz polimérica deve:

- Ligar as fibras e proteger as suas superfícies ao longo de toda sua vida útil;
- Difundir e desagregar, ordenadamente, as fibras com o objetivo de evitar a propagação de fissuras e consequente rotura do compósito;
- Transferir totalmente as tensões para as fibras por atrito ou adesão;
- Ser termicamente e quimicamente compatível com a fibra.

Atualmente existe uma grande variedade de matrizes sendo que, a seleção desta influencia diretamente a produção e o custo final do polímero reforçado com fibra (FRP). As matrizes podem ser originadas a partir de resinas termoendurecíveis e termoplásticas. No sector de reforço estrutural, as resinas

termoendurecíveis são as mais utilizadas no fabrico dos FRP, devido às diversas vantagens que apresentam, tais como, boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência (ACI, 1996). Carneiro e Teixeira (2008) referem que estas matrizes são fundamentalmente constituídas por epóxi, poliéster, viniléster, fenol, silicone e poliuretano.

As resinas termoplásticas, devido à ligação de forma linear entre as moléculas, podem ser frequentemente fundidas quando aquecidas e ser endurecidas quando arrefecidas. Estas apresentam vantagens sobre as resinas termoendurecíveis por serem mais resistentes a impactos e micro-fissurações e por terem maior tenacidade e ductilidade. No entanto, a fabricação de FRP com este tipo de resina é limitada, pois a sua alta viscosidade dificulta a incorporação de fibras longas (Sousa, 2009). Como Carneiro e Teixeira (2008) referem, estas são fundamentalmente constituídas por polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila.

As resinas termoendurecíveis, quando curadas, pela ação do calor ou tratamento químico, transformam-se num produto substancialmente infusível e insolúvel, com uma estrutura molecular complexa (Beber, 2003).

As fibras podem ser facilmente impregnadas neste tipo de resinas, sem haver necessidade de requisitos complexos, como a aplicação de pressões e temperaturas elevadas, e, quando comparadas com resinas termoplásticas, oferecem um melhor desempenho a nível da estabilidade térmica e química e estão sujeitas a menor retração e distensão (Araújo, 2002).

Dentro das resinas termoendurecíveis (Tabela 2.1), as epóxi são as mais utilizadas devido à sua extensa gama de propriedades físicas e mecânicas. Segundo o ACI (1996) as resinas de origem epoxídica proporcionam as seguintes características de desempenho geral:

- Uma série de propriedades mecânicas e físicas podem ser obtidas devido à diversidade de matérias-primas;
- Não são emitidos monómeros voláteis durante a cura e transformação;
- Baixo encurtamento durante o processo de cura;
- Excelente resistência a produtos químicos e solventes;
- Boa adesão a uma série de fibras e substratos.

Por outro lado, existem alguns inconvenientes associados com a utilização de resinas epoxídicas, nomeadamente:

- Custo é geralmente superior às resinas de poliéster e resinas de viniléster;
- Devem ser cuidadosamente tratadas para manter a resistência à humidade;
- O tempo de cura pode ser mais demorado.

Tabela 2.1 - Principais propriedades dos tipos de resinas termoendurecíveis mais comuns para o reforço estrutural (adaptado de Matthys, 2000)

<b>Tipos de Resina</b>	<b>Resistência à Tração <math>f_f</math> (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade <math>E_f</math>(Gpa)</b>	<b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Retração na Cura (%)</b>
<b>Epóxi</b>	55 a 130	2.1 a 3.5	11 a 14	5.0 a 12.0
<b>Viniléster</b>	73 a 81	3.0 a 3.5	11 a 13	5.0 a 10.0
<b>Poliéster</b>	55 a 130	2.8 a 4.1	12 a 13	1.0 a 5.0

Por vezes há necessidade de recorrer ao uso de aditivos e de cargas de enchimento na constituição de um material compósito. Utilizam-se aditivos para melhorar as propriedades na resina e para acrescentar alguma propriedade que esta não possua. Os tipos de aditivos mais usuais são, os flexibilizantes reativos, diluentes reativos, estabilizantes, extensores, retardadores de chama, cargas, corantes e pigmentos, e plastificantes.

As cargas de enchimento designadas na literatura internacional por “*fillers*”, são produtos químicos inertes, que são utilizados nas resinas com o objetivo de reduzir o efeito de contração na cura da matriz, elevar o teor de viscosidade na resina e a rigidez, melhorar o comportamento térmico do material e, especialmente, podem reduzir o custo global do material compósito (Juvandes, 1996a).

A Figura 2.4 ilustra o diagrama das curvas de tensão vs. deformação para os três sistemas de resinas, que tiveram uma cura a 80°C durante cinco horas.

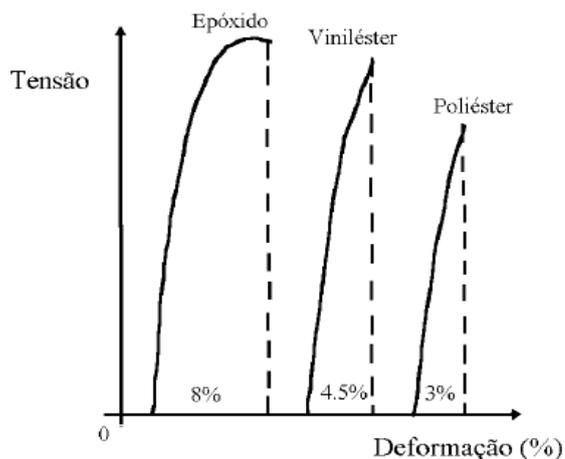


Figura 2.4 - Diagrama das curvas tensão vs. deformação dos principais tipos de resinas quando submetidos a uma temperatura de 80°C durante cinco horas na sua cura (reproduzido de Juvandes, 1996a)

### 2.2.3.2 Fibras

Na escolha do tipo de fibras deve-se ter em conta as propriedades que o material compósito necessitará, uma vez que, as fibras representam grande parte da sua resistência e rigidez (Juvandes, 1996a). Sendo assim, as propriedades dos materiais compósitos são principalmente influenciadas pela escolha das fibras, estas representam cerca de 50% a 70% do volume do compósito (Garcez, 2007).

Existem vários tipos de fibras e com grande variedade de propriedades comercialmente disponíveis. Devido à ótima transferência de carga entre as fibras e aproveitamento das suas propriedades, as fibras contínuas sob a forma de pequeno diâmetro são as mais apropriadas na constituição dos materiais compósitos aplicados nas obras de reforço estrutural (Matthys, 2000).

Sousa (2011) refere que a principal função da fase dispersa (fibras) é garantir que as solicitações mecânicas dos elementos estruturais sejam suportados, fornecendo assim, a rigidez e resistência necessária ao longo da sua extensão. Quando é aplicada uma carga exterior no material compósito, esta é transferida para as fibras através da interface, que assume também, um papel importante na resistência que confere ao compósito.

Neste sentido, percebe-se que as propriedades físicas e mecânicas dos FRP não só são influenciadas pelos seus principais constituintes, como também, o são, pela qualidade da sua ligação, denominada por interface. As propriedades da interface dependem da adesão e da compatibilidade mecânica entre

as fibras e a matriz, e do ângulo entre as fibras de reforço e a direção da solicitação imposta ao compósito (Costa, 2009).

As principais fibras contínuas usadas para a produção de materiais compósitos aplicados na engenharia civil são as fibras de carbono (C), de vidro (G) e de aramida (A), a partir destas produzem-se os respetivos compósito reforçados denominados internacionalmente por CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro) e AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida). Na Figura 2.5 são ilustradas estes três tipos de fibras referidos anteriormente.



Figura 2.5 - Aspeto visual de diferentes tipos de fibra: a) Fibra de Carbono b) Fibra de Vidro c) Fibra de Aramida (adaptado de Sousa, 2008)

Segundo Carneiro e Teixeira (2008) as fibras de carbono são formadas por dezenas de milhares de filamentos com espessura próxima de um quinto da de um fio de cabelo ( $5\mu\text{m}$  a  $18\mu\text{m}$ ) e são possuidoras de excelentes características mecânicas e resultam de um processo de fabricação que consiste na carbonização de polímeros orgânicos (Figura 2.6).

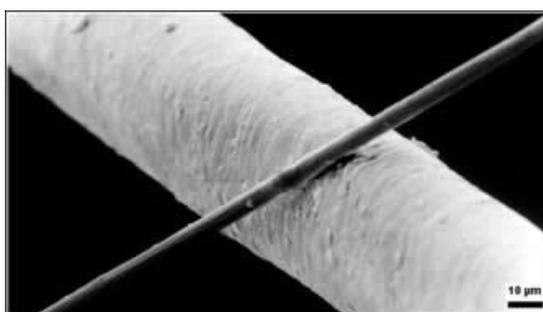


Figura 2.6 - Comparação de um fio de cabelo com uma fibra de carbono (wikipédia, 2012)

Somente três matérias-primas conseguiram alcançar a produção das fibras de carbono, que são elas, o rayon, a poliácridonitrila (PAN) e o pitch. As fibras fabricadas a partir de rayon não são viáveis na sua aplicação devido ao seu alto custo de processo e dificuldade na sua obtenção. As fibras sintéticas de poliácridonitrila alcançaram o domínio do mercado através da combinação de baixo custo de produção e

elevadas propriedades mecânicas e físicas. As fibras que são baseadas no piche como matéria-prima têm baixa resistência e módulo de elasticidade porque têm pouca ou mesmo nenhuma orientação preferencial. O piche quando comparado com as restantes matérias-primas que podem produzir fibras de carbono apresenta uma vantagem significativa, que é o facto de serem mais baratas (Beber, 2003).

Estas fibras apresentam elevada resistência e rigidez a ataques químicos, bom comportamento à fadiga, à variação térmica e possuem baixo peso, o que as torna bastante promissoras no âmbito da sua aplicação em obras de reforço estrutural. Porém, têm elevado custo e apresentam baixa resistência ao impacto e elevada condutibilidade térmica (Carneiro e Teixeira, 2008).

As fibras de vidro são formadas a partir da mistura de produtos com diferentes constituições baseadas na sílica, com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Estas apresentam boa resistência, baixo custo e possuem uma boa capacidade de deformação, no entanto, as baixas resistências à fadiga, à fluência e à abrasão, a fraca capacidade de aderência a polímeros e o facto de se degradarem na presença de água, ácidos e soluções alcalinas são os seus principais inconvenientes (Carneiro e Teixeira, 2008). Devido à relação custo de produção/propriedades mecânicas, estas fibras são bastante utilizadas nas obras de engenharia civil (ACI 1996a). As fibras de vidro mais usadas nos compósitos estruturais são as fibras do tipo E, do tipo S e o tipo AR. As fibras de vidro do tipo E, mais conhecidas por Vidro-E, são as mais utilizadas para o uso em geral e em quase todas as aplicações elétricas. As fibras de vidro do tipo S apresentam alta resistência e bom desempenho quando sujeitas a elevadas temperaturas, em contrapartida, estas boas características fazem delas as mais caras entre as fibras de vidro. Estes dois tipos de fibra são suscetíveis ao ataque pelos álcalis do cimento. Então surgiu um novo tipo de fibra de vidro a AR, estas são resultantes da adição de uma quantidade de zircónio nas fibras para que fiquem imunes à degradação pelos álcalis do cimento (Meneghetti, 2007).

As fibras de aramida, a mais popular fibra orgânica, são constituídas por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, formados de carbono, hidrogénio, oxigénio e nitrogénio e resultantes de extrusão e trefilação de um tipo de nylon, cuja estrutura molecular consiste em cadeias de benzeno e amida. Estas apresentam baixa densidade, condutibilidade elétrica e retração, elevada resistência à tração e ao impacto, e moderada resistência a ataques químicos. Em comparação com as fibras de vidro, são geralmente mais rígidas e resistentes e também possuem boa capacidade de deformação, mas degradam-se sob a luz solar (Carneiro e Teixeira, 2008).

Para melhor perceber a classificação quanto aos tipos e características destes três tipos de fibras mais correntes nas situações de reforço estrutural segue-se a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades típicas de algumas fibras (adaptado de Matthys, 2000)

Tipo de Fibras		Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Deformação última [%]	Peso específico [kg/m <sup>3</sup> ]	Diâmetro da fibra [μm]
<b>Carbono (C)</b>	Pitch (HM*)	3000 a 3500	400 a 800	0.4 a 1.5	1900 a 2100	9 a 18
	PAN (HM*)	2500 a 4000	350 a 700	0.4 a 0.8	1800 a 2000	5 a 8
	PAN (HT*)	3500 a 5000	200 a 260	1.2 a 1.8	1700 a 1800	5 a 8
<b>Vidro (G)</b>	Tipo E	1800 a 2700	70 a 75	3.0 a 4.5	2550 a 2600	5 a 25
	Tipo S	3400 a 4800	85 a 100	4.5 a 5.5	2550 a 2600	5 a 25
<b>Aramida (A)</b>	(IM*)	2700 a 4500	60 a 80	4.0 a 4.8	1400 a 1450	12 a 15
	(HM*)	2700 a 4500	115 a 130	2.5 a 3.5	1400 a 1450	12 a 15

\*HM - Alto módulo de elasticidade, HT - Alta resistência, IM - Módulo de elasticidade intermédio

Na Figura 2.7 é ilustrado a relação da tensão vs. extensão destas fibras comparadas com um tipo de aço tradicional. Nota-se que os FRP apresentam comportamento linear elástico até à rotura, ao contrário do comportamento do aço que é dúctil. É de salientar que as fibras de carbono apresentam elevada resistência à tração e elevado módulo de elasticidade quando comparadas com as restantes.

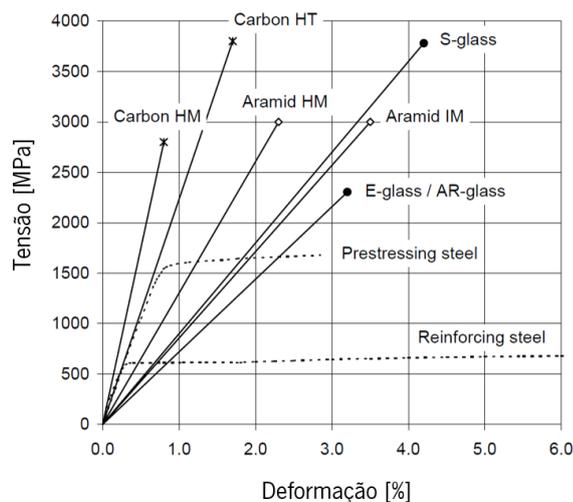


Figura 2.7 - Relação tensão vs. extensão do aço e de vários tipos de fibras (adaptado de Matthys, 2000)

## 2.2.4 Processos de produção

No âmbito da durabilidade e resistência dos polímeros reforçados com fibras, o modo como estes são produzidos tem bastante influência na sua constituição final, isto é, o comportamento das fibras e da matriz em que são embebidas são influenciadas pelo método de fabrico dos FRP, tornando a sua escolha muito minuciosa. Os FRP podem ser fabricados por meio de diversas técnicas, das quais se destacam, a pultrusão, a moldagem por contato e o enrolamento de filamento.

A pultrusão é uma técnica mais usada na produção de perfis estruturais pré-fabricados (por exemplo, em U, L, H ou I) e grelhas em que as fibras se encontram alinhadas ao longo do eixo do seu elemento (Garcez, 2007). Este método para além de gerar poucos desperdícios, consegue obter materiais de alta resistência, de baixo custo e com elevada qualidade (Sousa, 2011). De um modo geral, o processo de pultrusão é dividido em duas fases. Na primeira fase as fibras são introduzidas numa matriz em estado líquido e na segunda fase a matriz solidifica num molde com a secção transversal pretendida. Na Figura 2.8 podemos observar a típica disposição de uma linha de fabrico de compósitos por pultrusão.

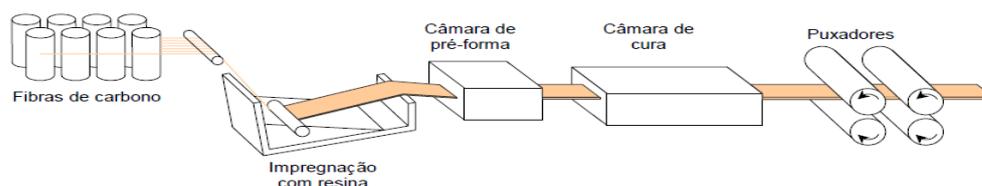


Figura 2.8 - Produção de FRP através do processo de pultrusão (reproduzido de Beber, 2003)

De acordo com Garcez (2007), a moldagem por contato, conhecida por *wet lay-up* ou *hand lay-up*, consiste na produção do compósito no local a ser implementado. Isto é, esta técnica consiste na colagem do laminado, manta ou tecido de fibra na estrutura através da aplicação de uma matriz polimérica (resina).

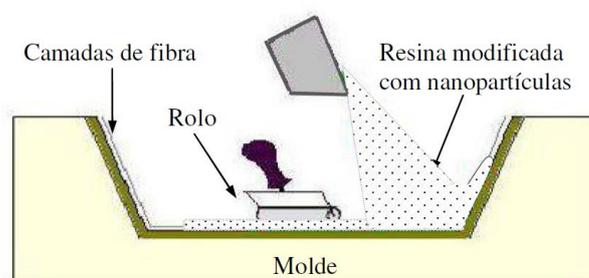


Figura 2.9 - Aplicação de FRP através da técnica de moldagem por contato (adaptado de Silva, 2014)

O enrolamento de filamento (Figura 2.10) é uma técnica no qual as fibras impregnadas com resina são enroladas, com muita perspicácia, num mandril, com taxa de rotação e posição controlada por um computador, para que as fibras possam ser posicionadas com alta precisão em diferentes direções (Garcez, 2007).

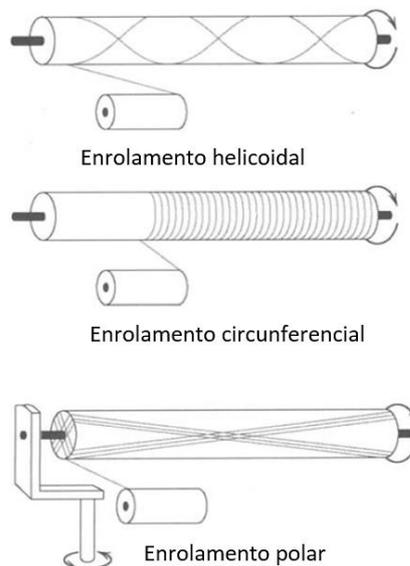


Figura 2.10 - Produção de FRP por enrolamento filamentar (adaptado de Garcez, 2007)

### 2.2.5 Sistemas de reforço

No âmbito da aplicação dos compósitos reforçados com fibras (FRP) no reforço de elementos estruturais, existem basicamente dois tipos de sistemas:

- i. Sistemas curados “in situ”;
- ii. Sistemas pré-fabricados.

A configuração e a disposição das fibras permitem também classificar estes sistemas segundo três grupos (Figura 2.11): unidirecionais (1D), bidirecionais (2D) e multidirecionais (3D).

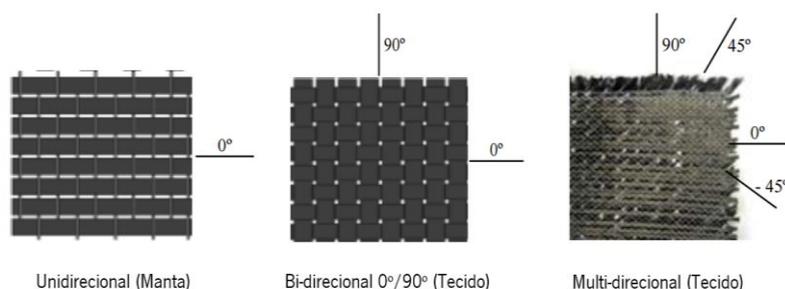


Figura 2.11 - Orientação das fibras (adaptado de Juvandes, 2011)

Os sistemas curados “in situ” são compostos por um conjunto de fibras em forma de fios, tecidos ou mantas, em estado seco ou pré-impregnados numa resina de saturação, formando assim, os compósitos reforçados com fibras (FRP). As resinas também são responsáveis pela ligação destes compósitos ao elemento de betão armado a ser reforçado. O processo de fabrico e a aplicação deste tipo de sistemas é efetuado na zona do elemento a reforçar (Sousa, 2008).

De acordo com Barros (2007) os sistemas curados “in situ” são identificados a partir da orientação das fibras, isto é, nas mantas as fibras são distribuídas unidireccionalmente, enquanto os tecidos, podem apresentar fibras distribuídas em várias direções (fibras unidirecionais, bidirecionais e multidirecionais). Na Tabela 2.3 apresentam-se as formas de FRP disponíveis para o uso destas técnicas.

Tabela 2.3 - Descrição das mantas e dos tecidos utilizados nos sistemas curados “in situ” ( adaptado de Juvandes, 1999)

Designação	Descrição	Orientação das Fibras	Estado
<b>Mantas “Sheets”</b>	Disposição de faixas contínuas e paralelas de fibras sobre uma rede de proteção. (200 – 300 g/m <sup>2</sup> )	Unidirecionais	Secas
“Woven Roving”*	Entrelaçamento direcionado de dois fios ou faixa de fibras. (600 – 800 g/m <sup>2</sup> )	Bidirecionais: 0/+90° 0/+45° 0/-45°	Pré-impregnadas**
<b>Tecidos “Fabrics”</b>	“Mat”* Espalhamento aleatório das fibras num tapete rolante que, depois, é pulverizado com resina para adquirir consistência.	Multidirecional	Secas
“Cloth”*	Fios contínuos tecidos por um processo têxtil convencional. (150 – 400 g/m <sup>2</sup> )	Unidirecional ou Bidirecional ou Multidirecional	Pré-impregnados**

\* - Designação internacional para o arranjo das fibras

\*\* - Aplicação de uma camada suave de resina sem a cura total para criar alguma coesão entre as fibras (estado pré-impregnado)

Nos sistemas pré-fabricados os produtos de FRP são fornecidos para a obra com a geometria final, isto é, com dimensão e secção transversal definidas em projeto. Geralmente, estes materiais já vem com tratamento adequado para suportar os fatores ambientais a que vai estar exposto (Marques, 2008). Os sistemas laminados semi-rígidos de FRP do tipo unidirecional (Figura 2.12) são a forma mais comum usada e apresenta-se com a espessura típica de 1,2 mm a 1,4 mm, e com largura variável. Segundo Juvandes (2011) estes sistemas resultam de um conjunto de camadas contínuas de fibras que são impregnadas numa resina termoenduricível e são consolidados por um processo de pultrusão, com controlo das suas dimensões em fábrica.

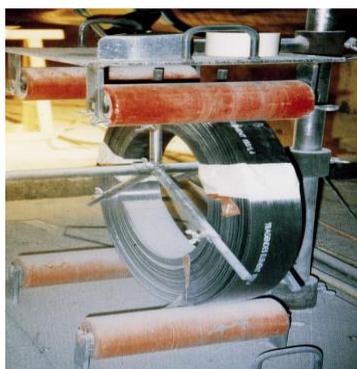


Figura 2.12 - Laminados de FRP (reproduzido de Rodrigues, 2005)

## 2.2.6 Técnicas de reforço à flexão

Atualmente existem diversas técnicas que podem ser usadas no reforço de elementos estruturais. No âmbito desta dissertação, destacam-se, a técnica tradicional (encamisamento com betão armado), a técnica de colagem externa, designada na literatura internacional por técnica EBR (Externally Bonded Reinforcement) e a técnica designada na literatura internacional por NSM (Near Surface Mounted), que consiste na aplicação de CFRP em ranhuras efetuadas na zona do betão de recobrimento.

### 2.2.6.1 Encamisamento com adição de betão armado

O encamisamento é a técnica de reforço mais comum para melhorar o desempenho de elementos estruturais. Esta técnica consiste em aumentar a secção transversal, através de uma adição suplementar de betão e armadura, e deve ser usada quando há necessidade de mobilizar as tensões de compressão e reduzir a deformabilidade dos elementos estruturais. Esta técnica apresenta como vantagens a economia garantida pela não necessidade de mão-de-obra especializada, boa resistência ao fogo, boa

compatibilidade com o elemento a reforçar, não alteram a ductilidade com o modelo reforçado e permitem o reforço de elementos de betão com resistências mecânicas muito baixas. Por outro lado, o aumento da secção transversal, que leva ao incremento substancial do peso próprio do elemento reforçado, e o tempo de cura do betão são os seus principais inconvenientes (Appleton e Gomes, 1997).

O reforço por encamisamento pode ser aplicado em vigas ou pilares, mas tendo em conta a temática da presente dissertação, apenas serão apresentados os casos de aplicação com o reforço à flexão de vigas (Figura 2.13).

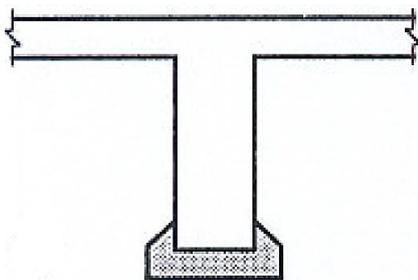


Figura 2.13 - Viga com reforço à flexão (reproduzido de Appleton e Gomes, 2007)

Segundo Appleton e Gomes (1997) para efetuar de um encamisamento adequado devemos seguir as seguintes operações:

a) Escoramento:

A execução de um escoramento permite que o reforço seja aplicado com níveis de tensão mais baixos na secção inicial, garantindo assim, menos deformabilidade e melhora o comportamento a rotura. Em alguns casos o uso desta prática é indispensável para evitar danos ou mesmo o colapso durante a realização do reforço estrutural.

b) Preparação da superfície

A preparação da superfície é fundamental para obter uma boa ligação entre o material de adição e o existente. Esta operação consiste em remover o betão degradado, aumentar a rugosidade da superfície e remover as poeiras. Podem ser executados diversos tipos de preparações:

- i. Utilizar um martelo de agulhas, um martelo elétrico ou um escopro para tornar a superfície mais rugosa (Figura 2.14 a);
- ii. Retirar a camada de betão de recobrimento deixando expostas as armaduras iniciais (Figura 2.14 b);

- iii. Quando o elemento se encontra muito degradado há necessidade de deixar as armaduras iniciais livres (Figura 2.14 c).

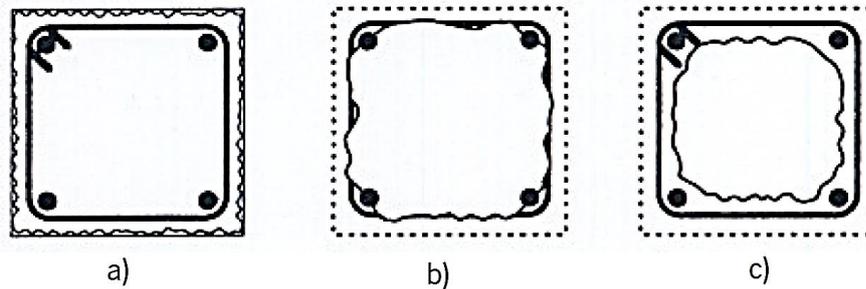


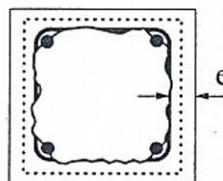
Figura 2.14 - Tipos de preparação de superfície (adaptado de Appleton e Gomes, 2007)

- c) Colocação de novas armaduras

Após o processo de preparação da superfície faz-se a devida colação das armaduras adicionais, exteriormente à secção.

- d) Betonagem

O betão utilizado tem, em geral, um valor reduzido para a máxima dimensão do agregado, sendo recomendado um valor inferior a 1/3 da espessura a betonar. A utilização de argamassas justifica-se quando a espessura a betonar é muito pequena (inferior a 60 mm). Na Figura 2.15 indicam-se os valores mínimos da espessura a betonar em função do tipo de material utilizado.



$$e_{min} \begin{cases} 50 \text{ mm} - \text{Betão projetado} \\ 75 \text{ a } 100 \text{ mm} - \text{Betão normal cofrado} \\ 40 \text{ a } 60 \text{ mm} - \text{Argamassa especial} \end{cases}$$

Figura 2.15 - Espessura a betonar de acordo com o tipo de material (adaptado de Appleton e Gomes, 2007)

- e) Cura

Para se obter uma maior resistência e aderência deve ser efetuada uma cura eficiente através de molhagens sucessivas ou da aplicação de membranas de cura.

### 2.2.6.2 Técnica EBR

A técnica de colagem externa (EBR) é a técnica de reforço mais frequentemente utilizada, e consiste na colagem do reforço de CFRP nas faces exteriores do elemento estrutural, de acordo com o tipo de reforço que se pretende efetuar. O reforço adotado pode ser sob a forma de sistemas pré-fabricados (laminados) ou sob a forma de sistemas “in situ” (mantas e tecidos). Esta técnica apresenta como vantagens a rapidez e facilidade de execução, contudo, apresenta também desvantagens, devido ao facto destes sistemas de reforço serem colados externamente, ficando assim, expostos a diversos fatores ambientais (incêndios, humidade, temperatura, radiação UV) e ainda pelo facto de serem suscetíveis a atos de vandalismo, colocando em causa a integridade do reforço (Oliveira, 2013). A aplicação destes sistemas no reforço de elementos estruturais envolve três tarefas fundamentais (Dias e Barros, 2004):

- i. Preparação da superfície do elemento estrutural para assegurar que a sua base tenha boas condições de aderência. Nos sistemas curados “in situ” deve usar-se um esmeril na superfície (Figura 2.16 a), enquanto que, nos sistemas pré-fabricados (laminados), a superfície do elemento deve ser boiardada ou ser “picotada” com o recurso a um martelo de agulhas (Figura 2.16 d). Posteriormente, deve aplicar-se ar comprimido na superfície do elemento, para assegurar que esta seja totalmente limpa. Em alguns casos de reforços com estes sistemas usa-se uma camada de primário (Figura 2.16 b e Figura 2.16 e), de modo a melhorar a aderência dos CFRP á superfície do elemento a reforçar;
- ii. Colagem do sistema de CFRP de reforço. Na Figura 2.16 c) e 2.16 f) apresentam-se as colagens dos sistemas de reforço CFRP, manta e laminado;
- iii. Controlo da qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

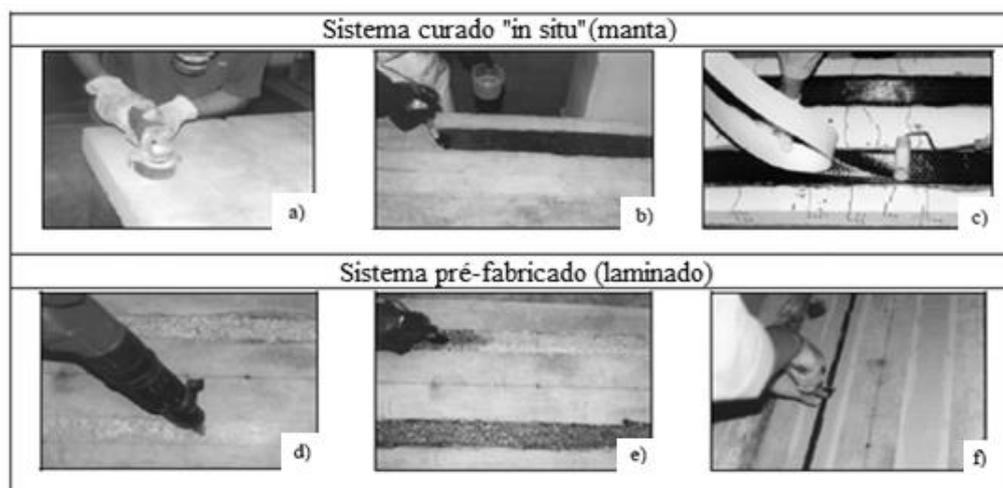


Figura 2.16 - Aplicação da técnica EBR com sistemas de reforço de CFRP (adaptado de Dias, 2008)

Na Figura 2.17 é possível observar detalhadamente, através de um organograma, estas três tarefas necessárias para efetuar a técnica de colagem externa (EBR).

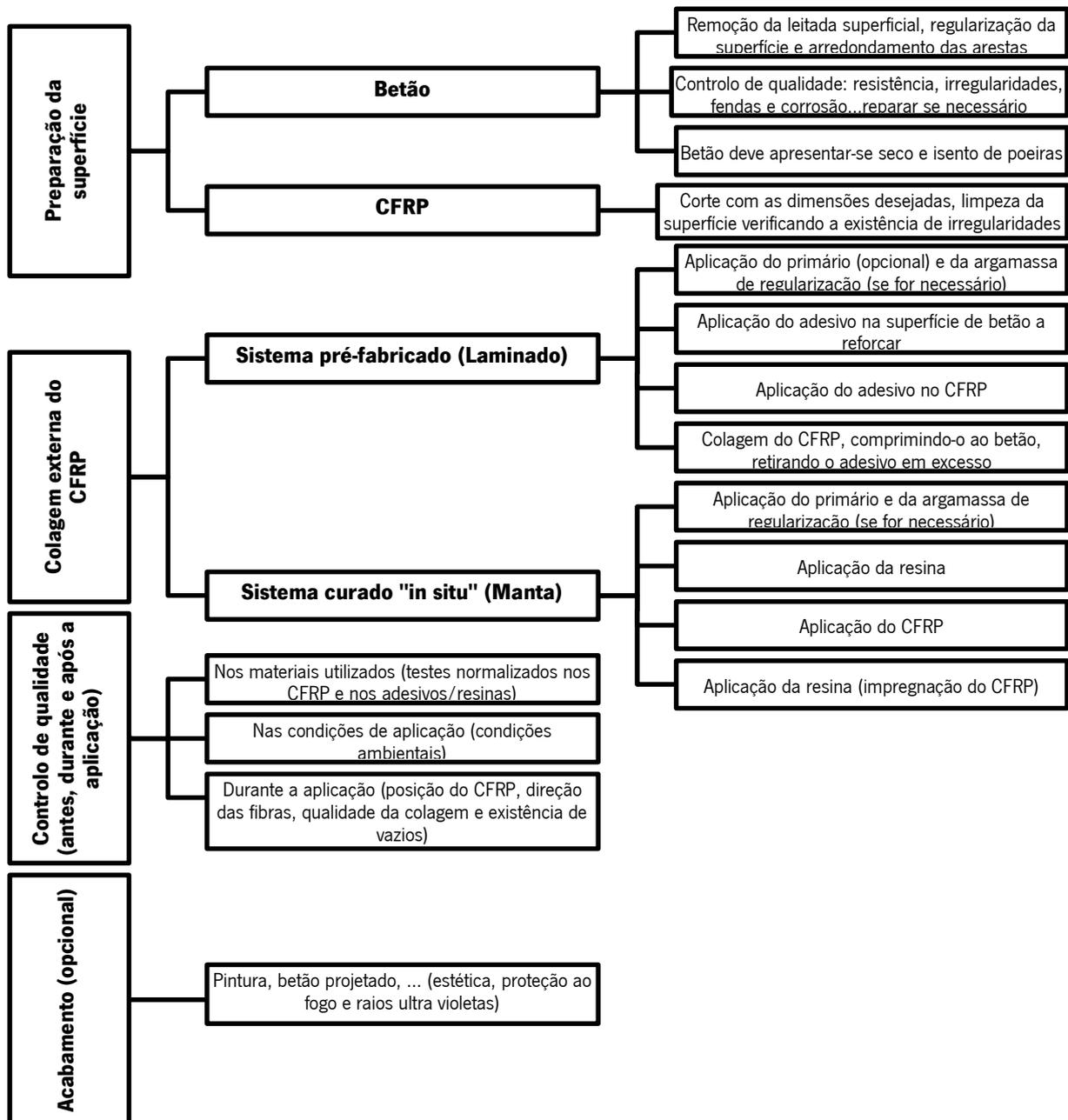


Figura 2.17 - Organograma do processo de aplicação da técnica EBR (adaptado de Dias, 2008)

### 2.2.6.3 Técnica NSM

Mais recentemente, de forma a contornar algumas das deficiências reveladas pela técnica EBR, surgiu a técnica NSM. Esta técnica consiste na inserção de compósitos pré-fabricados (laminados de CFRP) em entalhes efetuados na zona de recobrimento do elemento de betão armado a reforçar. Este processo assegura um aumento da durabilidade do reforço pois os elementos de reforço estão menos expostos aos diversos fatores ambientais exteriores e são menos suscetíveis a atos de vandalismo (Carvalho, 2010).

Segundo Dias (2008) o procedimento para a aplicação da técnica de reforço NSM com CFRP segue os passos seguintes:

- i. Execução dos entalhes ao longo da superfície do elemento de betão a reforçar (Figura 2.18 a);
- ii. Aplicação de ar comprimido para efetuar a correta limpeza do entalhe, proporcionando uma melhor aderência entre o betão e o adesivo (Figura 2.18 b);
- iii. Corte e posteriormente limpeza com o uso de acetona do laminado de CFRP (Figura 2.18 c e Figura 2.18 d);
- iv. Produção do adesivo epóxi segundo as recomendações do fabricante (Figura 2.18 e);
- v. Preenchimento do entalhe com adesivo epóxi (Figura 2.18 f);
- vi. Aplicação do adesivo nas faces do laminado de CFRP (Figura 2.18 g);
- vii. Introdução do laminado de CFRP no entalhe retirando-se o adesivo em excesso (Figura 2.18 h).

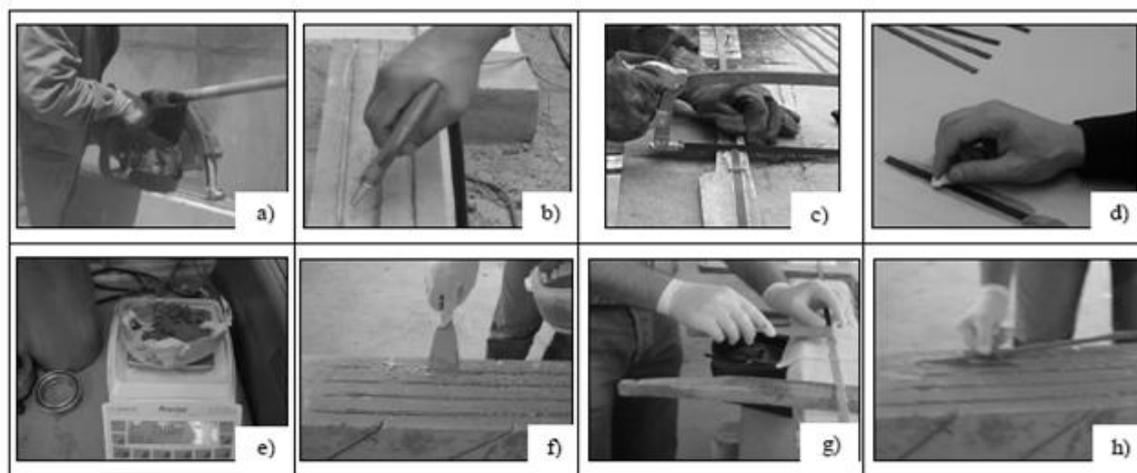


Figura 2.18 - Procedimento de aplicação de laminados de CFRP segundo a técnica NSM (adaptado de Dias, 2008)

A Figura 2.19 apresenta um organograma que menciona, esquematicamente, os passos fundamentais numa intervenção de reforço, com compósitos de CFRP, utilizando a técnica NSM. Neste procedimento também se deve garantir o controlo de qualidade nos procedimentos de reforço e nos materiais aplicados, como já foi referido na técnica de reforço EBR.

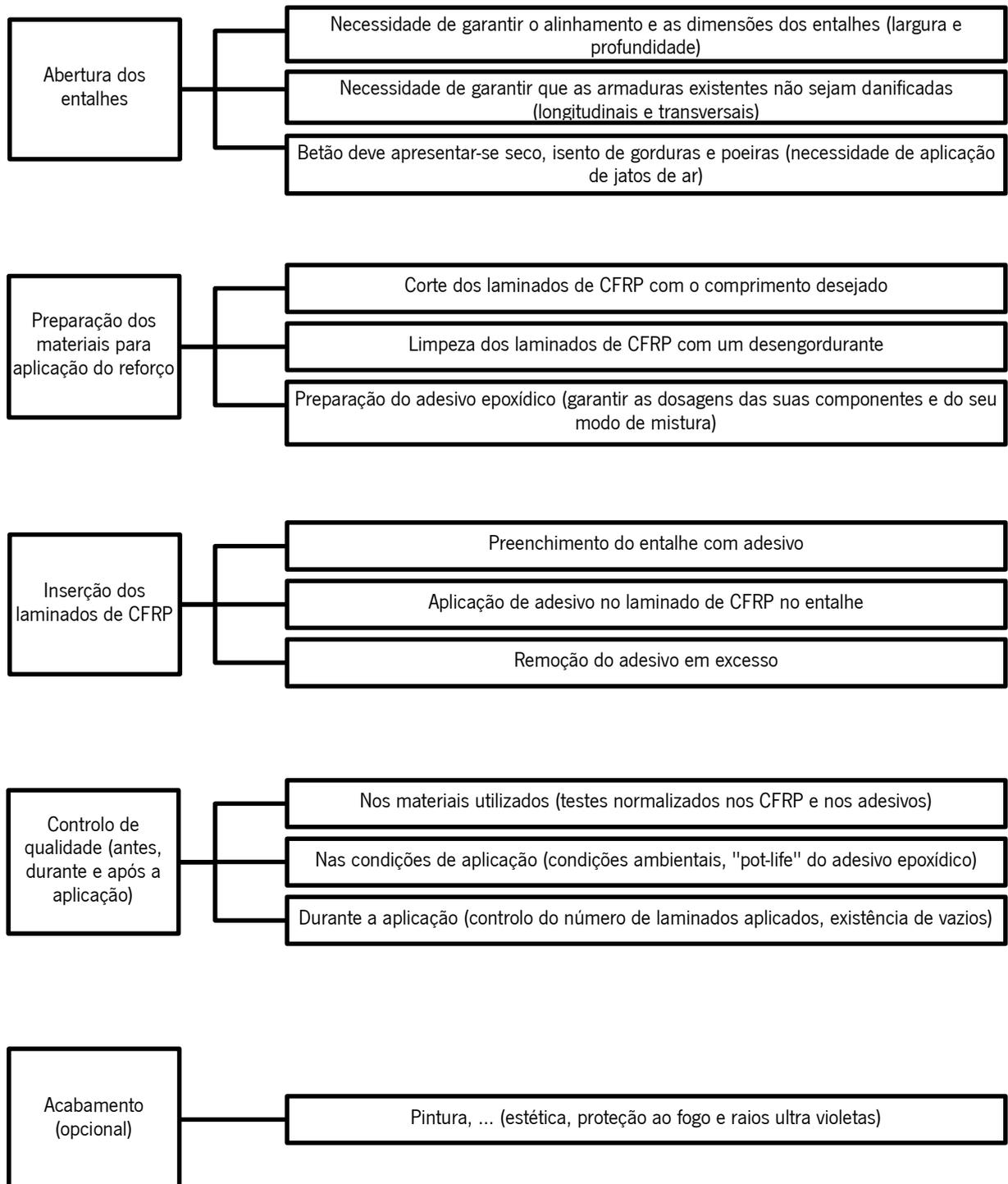


Figura 2.19 - Organograma do processo de aplicação da técnica NSM (adaptado de Dias, 2008)



## **Capítulo 3**

### **ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**

#### **3.1 Considerações gerais**

A indústria da construção civil é responsável por uma grande quantidade e diversidade de impactos ambientais originados, principalmente, devido ao consumo das matérias-primas e à acumulação desadequada de resíduos.

Cerca de 20% a 50% do consumo total de recursos naturais provêm da prática realizada na construção civil, e são gerados aproximadamente 100 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) dos 1,3 biliões de toneladas de resíduos produzidos na União Europeia. Em Portugal registou-se uma produção de 7,5 milhões de toneladas de RCD no ano de 2005 (Santos et al., 2011).

A geração de resíduos industriais para além dos danos que causa sobre o meio ambiente, tem sido um grande problema a nível económico para as empresas, pois há grandes consumos de materiais e dinheiro, desgaste de equipamentos, mão-de-obra desaproveitada, custo de armazenagens, entre muitos outros aspetos negativos. Sendo assim, torna-se necessário reconsiderar os processos de produção atuais, introduzindo conceitos que assegurem o desenvolvimento sustentável, tais como: produção mais limpa, indicadores ambientais, ecoeficiência, relatórios de sustentabilidade, etc. (Sonnemann et al., 2004).

Na atualidade, a sociedade tem demonstrado uma elevada preocupação no que diz respeito às ações humanas frente às necessidades de preservação, conservação e recuperação dos recursos naturais ligados à garantia da qualidade de vida no planeta.

Ramos et al. (2008) mencionam o desenvolvimento do ensino da avaliação de impactos ambientais em diversos cursos em Portugal, particularmente em engenharias, levantando a importância deste estudo na formação profissional. Afirmam também, que um dos maiores desafios que a sociedade está a enfrentar, é a interação das questões ambientais com as atividades económicas.

Conforme Chehebe (1997), todo o produto, provoca um impacto ambiental, quer derivado do seu procedimento para a aquisição de matérias-primas, do seu processo de fabrico, de utilização ou de disposição final, não importando de que material seja feito, como por exemplo de madeira, metal, vidro, plástico ou qualquer outro tipo.

Devido à crescente preocupação da sociedade com a falta de recursos naturais e a degradação do meio ambiente, surgiu a necessidade de desenvolver novos métodos e ferramentas de gestão que consigam estudar modelos de produção ambientalmente mais sustentáveis, reduzindo assim, os impactos associados ao ciclo de vida de um produto. Com este propósito, desenvolveu-se a ACV, que consiste na avaliação dos efeitos que um sistema de produto, atividade ou serviço provocam no meio ambiente, através da identificação e quantificação dos seus impactos, tais como o consumo de energia, de recursos naturais e a geração de resíduos líquidos, sólidos e as emissões atmosféricas. (Ferrão, 1998)

A ACV é uma ferramenta que permite estabelecer um inventário dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, “do berço ao túmulo”, a fim de possibilitar uma comparação entre produtos com funções semelhantes e poder-se conhecer melhor os seus efeitos no meio ambiente. Esta expressão significa que um estudo ACV abrange uma análise detalhada desde o processo de extração de matérias-primas, passando pelos processos de fabricação, distribuição e utilização, até à disposição final do produto ou serviço em causa.

A Figura 3.1 ilustra os processos do ciclo de vida de um produto e as entradas/saídas utilizadas numa análise do ciclo de vida.

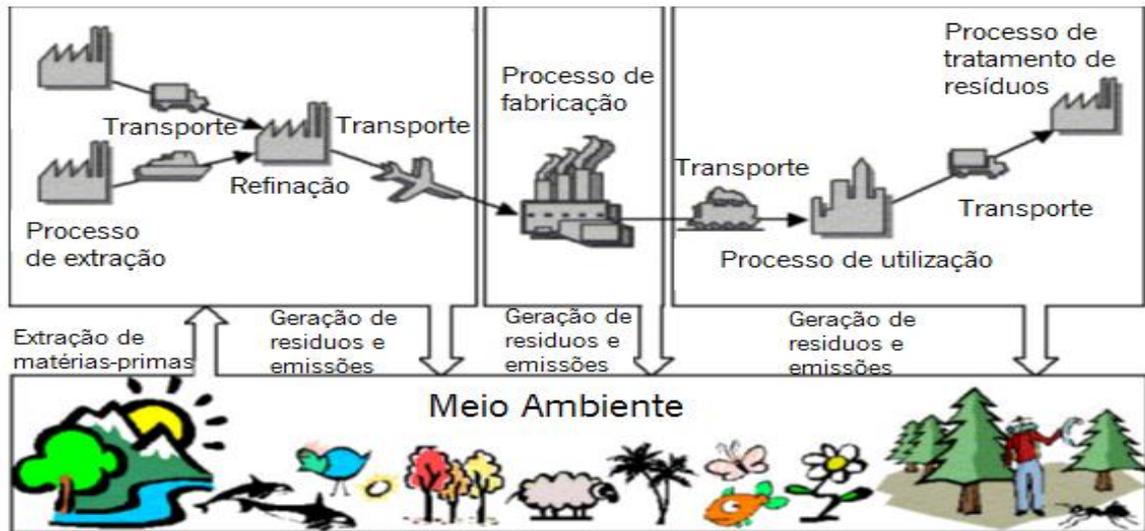


Figura 3.1 - Ciclo de vida de um produto e as suas entradas/saídas (adaptado de Joshi et al., 2012)

### 3.2 Conceitos históricos e normalizações

Nos Estados Unidos da América (EUA) em 1970, surgiu um método conhecido por *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA), que consistia num estudo baseado no levantamento quantificado de recursos e das emissões na fase do ciclo de vida ambiental de um produto. Posteriormente este método foi aperfeiçoado, dando origem à ferramenta de análise do ciclo de vida (ACV), conhecida na literatura intencional por *Life Cycle Assessment* (LCA), utilizada nos EUA a partir de 1990.

O instituto denominado por *Midwest Research Institute* (MRI) efetuou um dos primeiros estudos quantificando as necessidades de recursos, emissões e resíduos gerados por diversas embalagens de bebidas para a companhia Coca-Cola em 1969. Estes estudos nunca foram publicados devido ao carácter confidencial do seu conteúdo, sendo no entanto, utilizados pela companhia desde o início do ano 1970 como um “input” nas suas decisões sobre negócios de embalagens.

O resultado do trabalho realizado nesta companhia utilizando o estudo REPA foi bastante interessante, pois demonstrou que as garrafas de plástico não eram piores, do ponto de vista ambiental, do que as garrafas de vidro. Anteriormente, a comunidade técnica tinha uma má ideia acerca da utilização de plásticos devido à sua má reputação baseada em más interpretações (Hunt e Franklin, 1996).

A agência norte americana de proteção ambiental, conhecida na literatura internacional por *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) encomendou o instituto MRI em 1972, para realizar um estudo nas embalagens de cervejas e sumos, com o propósito de efetuar avaliações ambientais na utilização de

embalagens de vidro reutilizáveis em vez de embalagens não reutilizáveis, porque quer a nível ambiental e/ou económico, era de especial interesse proceder com a substituição das embalagens não reutilizáveis. Este estudo REPA, foi na altura o mais conceituado até a data, pois envolveu diversos intervenientes, tais como, a indústria de vidro, alumínio, papel, plástico e aço e os seus respetivos fornecedores. Este preciso estudo levou com que alargasse o conhecimento da comunidade em geral, no sentido da enorme vantagem que o uso de embalagens reutilizáveis traziam sobre as não reutilizáveis. Desta forma, a USEPA contribuiu fortemente para a consolidação da ferramenta de gestão ambiental REPA, atualmente, conhecida por ACV.

Após um período de tempo em que o interesse por este método decresceu, em 1984 o Laboratório Federal Suíço para Teste e Investigação de Materiais (EMPA), publicou um relatório que tinha como objetivo estabelecer uma base de dados para os materiais de embalagem mais importantes, tais como, vidro, papel, alumínio e cartão, e neste, também se introduziu um método para normalizar e agregar emissões para a água e para o ar (Ferreira, 2004).

A partir do ano 1990, tanto na Europa como nos EUA, houve um elevado acréscimo no interesse público relativamente as atividades de ACV. A *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), para que a comunidade geral entenda-se melhor o conceito da técnica ACV, organizou vários *workshops* e reuniu profissionais, investigadores e utilizadores para colaborar no aperfeiçoamento da metodologia ACV. Os objetivos dos *workshops* eram discutir a terminologia que descreve a atual ACV, chegando ao consenso que a ACV seria uma ferramenta definida por três fases interrelacionadas: inventário, avaliação de impactos e a avaliação de melhorias. (Alcobia, 2009)

Em 1992 foi formada a Sociedade para a Promoção do Desenvolvimento de Ciclo de Vida (SPOLD), com a finalidade de juntar recursos, para aumentar a rapidez do desenvolvimento da metodologia ACV para orientar as empresas quanto à aplicação desta ferramenta (Ferreira, 2004).

Neste ano surgiu uma nova fase para se adicionar as restantes, a fase de definição do âmbito e objetivo, ficando assim, a ACV constituída por quatro fases (Orlando, 2014).

A *Environmental Protection Agency* (EPA) em 1993, dos Estados Unidos, define a ACV como “uma ferramenta para avaliar, de forma holística, um produto ou uma atividade durante todo seu ciclo de vida”.

A Organização Internacional para a Normalização, conhecida internacionalmente por *International Organization for Standardization* (ISO) criou em 1992 um comité técnico (TC 207/SC 5) tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV. Até o ano de 2006 foram publicadas as seguintes normas relacionadas com ACV:

- a) ISO 14040. *Life Cycle Assessment. Principles and Framework* (1997) – Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura;
- b) ISO 14041. *Life Cycle Assessment. Goal and Scope Definition and Inventory Analysis* (1998) – Avaliação do Ciclo de Vida. Definição do Objetivo e do Escopo e Análise de Inventário;
- c) ISO 14042. *Life Cycle Assessment. Life Cycle Impact Assessment* (2000) – Avaliação do Ciclo de Vida. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida;
- d) ISO 14043. *Life Cycle Assessment. Life Cycle Impact Assessment* (2000) – Avaliação do Ciclo de Vida. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida;
- e) ISO/TR 14047. *Life Cycle Assessment. Examples of Application of ISO 14042* (2000) – Avaliação do Ciclo de Vida. Exemplos de Aplicação da ISO 14042;
- f) ISO/TS 14048. *Life Cycle Assessment. Data Documentation Format* (2001) – Avaliação do Ciclo de Vida. Formato de dados e documentação;
- g) ISO/TR 14049. *Life Cycle Assessment. Examples of Application of ISO 14041 for goal and scope definition and inventory analysis* (2000) – Avaliação do Ciclo de Vida. Exemplos de aplicação da ISO 14041 para definição do objetivo e do escopo e análise de inventário.

A partir de 2006, as normas de a) a d) foram agrupadas nas normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006):

- a) ISO 14040. *Life Cycle Assessment. Principles and Framework* (2006) – Avaliação do Ciclo de Vida. Princípios e Estrutura;
- b) ISO 14044. *Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines* (2006) – Avaliação do Ciclo de Vida. Requisitos e Diretrizes.

### **3.3 Metodologia da ACV**

A ACV é uma ferramenta versátil que tem como objetivo levar em consideração todos os aspectos ambientais das operações industriais, melhorar os resultados financeiros, aumentar a eficiência e proteger o meio ambiente. A metodologia (Figura 3.2) descrita na Norma ISO 14040 (1997) é formada por quatro fases:

- I. Definição do objetivo e âmbito;

- II. Análise do Inventário do ciclo de vida;
- III. Avaliação do impacto do ciclo de vida;
- IV. Interpretação.

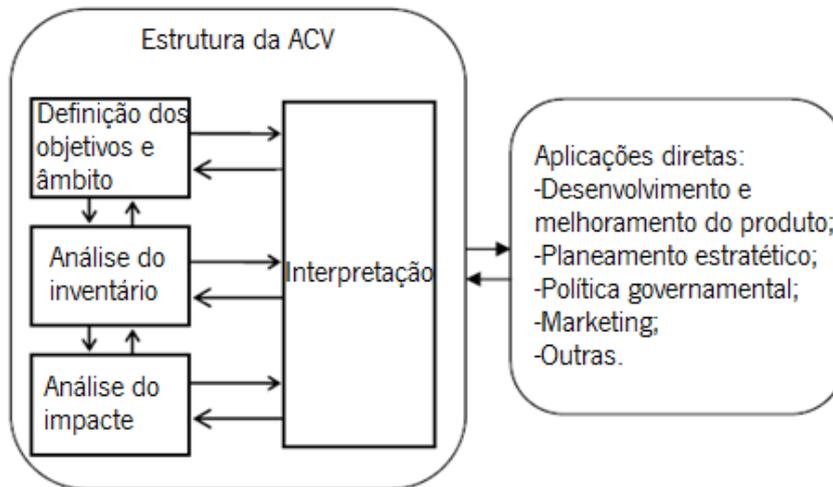


Figura 3.2 - Metodologia de uma ACV (adaptado de ISO 14040, 1997)

### 3.3.1 Definição do objetivo e âmbito

A definição dos objetivos e do âmbito do estudo de uma ACV é fundamental, uma vez que é nesta fase que se efetuam determinações essenciais. De conformidade com a perceção e os propósitos pretendidos, a estrutura de análise é definida e as deliberações sobre as fases posteriores são determinadas.

#### 3.3.1.1 Objetivo do estudo

De acordo com a Norma ISO 14040 (1997) o objetivo de um estudo ACV deve indicar de forma clara a aplicação pretendida, os motivos para a realização do estudo, o público-alvo a quem os resultados do estudo vão ser comunicados

#### 3.3.1.2 Âmbito do estudo

Segundo a Norma ISO 14040 (1997) na definição do âmbito de um estudo ACV, devem ser considerados e devidamente descritos os seguintes itens:

- As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, os sistemas;

- A unidade funcional;
- O sistema de produto a ser estudado;
- Os limites do sistema de produto;
- Os procedimentos de atribuição;
- As categorias de impacto e metodologias de avaliação de impacto, e posterior interpretação a ser usada;
- Requisitos de dados;
- Premissas;
- Limitações;
- Requisitos iniciais de qualidade dos dados;
- Tipo de análise crítica, se necessário;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

O âmbito deve ser suficientemente bem definido para garantir que a extensão, a profundidade e o detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes, para alcançar o objetivo proposto.

A ACV é uma técnica iterativa, por isso, o âmbito do estudo pode precisar de ser alterado durante a sua elaboração à medida que é retirada informação adicional.

O sistema deve ser dividido em diversos subsistemas interligados por fluxos de energia e de materiais.

A unidade funcional é uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema do produto, cujo seu principal objetivo é proporcionar uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas. A função do sistema e da unidade funcional são elementos fundamentais de uma ACV, sem estes, não seria possível efetuar uma comparação significativa e válida. A ACV é sempre ancorada numa descrição precisa e quantitativa da função fornecida pelo sistema em análise (ILCD 2010 a).

Os limites do sistema determinam quais os processos unitários que devem ser incluídos numa ACV. Vários fatores demarcam os limites do sistema, incluindo os princípios adotados, critérios de corte, dados e restrições de custo e a seleção de entradas e saídas, o nível de agregação dentro de uma categoria de dados e a modelagem do sistema deve ser compatível com o objetivo do estudo. Qualquer decisão de omitir os estágios do ciclo de vida, processos, entradas ou saídas deverá ser claramente indicada, e as razões e implicações para a sua omissão devem ser explicadas.

Os requisitos de qualidade dos dados descrevem, em termos gerais, as características dos dados necessários para o estudo. Estes requisitos devem ser definidos para permitir que os objetivos e âmbito do estudo ACV sejam cumpridos, e de acordo com a norma ISO 14040 (1997) devem abordar:

- Cobertura relacionada com o tempo;
- Cobertura geográfica;
- Cobertura tecnológica;
- Precisão, integridade e representatividade dos dados;
- Consistência e reprodutibilidade dos métodos utilizados ao longo da ACV;
- Fontes dos dados e sua representatividade;
- Incerteza da informação.

Sempre que um estudo se destina a ser utilizado em afirmações comparativas destinadas a serem divulgadas ao público, os requisitos de qualidade dos dados declarados acima devem ser abordados.

Em estudos comparativos, a ISO 14040 estabelece que a equivalência dos sistemas a serem comparados deve ser avaliada antes da fase de interpretação dos resultados. Os sistemas devem ser comparados utilizando a mesma unidade funcional e considerações metodológicas equivalentes, tais como desempenho, limites do sistema, qualidade dos dados, procedimentos de distribuição, regras de decisão sobre a avaliação de entradas e saídas e a avaliação do impacto. Qualquer diferença entre sistemas relativamente a estes parâmetros deve ser identificada e descrita.

### **3.3.2 Análise do inventário do ciclo de vida**

A segunda fase de uma ACV é a análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que segundo a Norma ISO 14040, consiste na compilação e quantificação dos dados recolhidos, das entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) para cada processo unitário incluído nos limites do sistema (Figura 3.3). Isto é, o ICV é um sistema de compilação de dados e de quantificação das necessidades de matérias-primas, água, matérias auxiliares e energia, das emissões atmosféricas, emissões para a água e solos, dos resíduos sólidos e outros lançamentos associados ao ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (EPA, 2006).

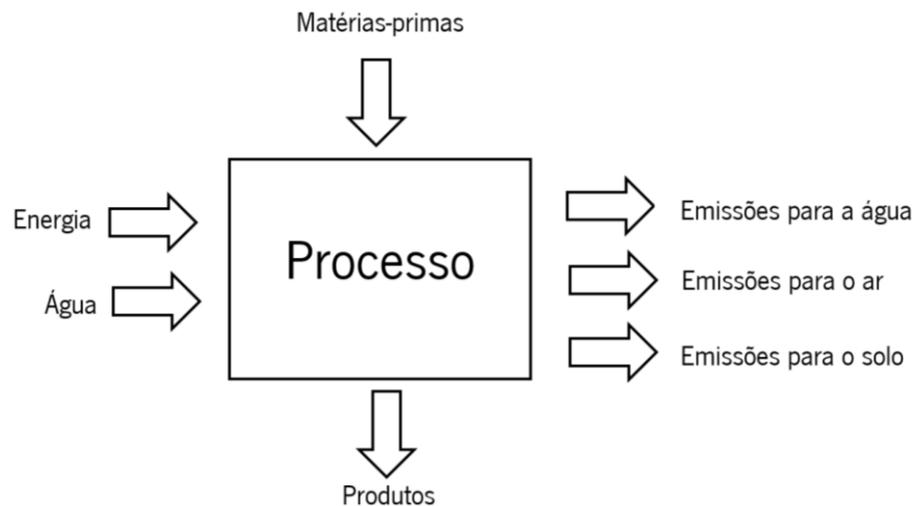


Figura 3.3 - Fase do inventário do ciclo de vida (adaptado de Lippiatt, 2002)

A recolha de dados é realizada em dois tipos de fluxo, de entrada e de saída, sendo um processo complexo e forte em recursos, podendo os procedimentos utilizados para esta recolha variar conforme o âmbito do estudo. Estes dados devem estar relacionados com a unidade funcional definida na primeira fase de um estudo ACV.

O ICV é um processo iterativo, uma vez que, à medida que os dados são conhecidos e mais informação acerca do sistema é adquirida, são identificados novos requisitos de dados assim como novas limitações, necessitando assim, de uma modificação no processo de recolha de dados para que estes, cumpram os objetivos definidos no estudo. Algumas vezes, é possível o aparecimento de novas questões que requerem a retificação dos objetivos e âmbito do estudo. (ISO 14040, 1997)

De acordo com Ferreira (2004) o ICV processa-se através das seguintes fases: construção da árvore do processo; definição dos limites do sistema (de produto com o ambiente e de produto com outros sistemas de produto); finalização dos limites do sistema; recolha de dados; procedimentos de cálculos (procedimentos de afetação e procedimentos de construção da tabela de inventário).

### 3.3.3 Avaliação do impacto do ciclo de vida

A terceira fase de uma ACV é a avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), que segundo a norma ISO 14044 (2006), o seu principal objetivo é fornecer informações adicionais para auxiliar os resultados da fase anterior (ICV), de modo a compreender melhor a sua importância ambiental e avaliar a magnitude e a relevância dos impactos ambientais associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida.

Isto é, a AICV correlaciona os resultados provenientes da fase anterior (ICV) às suas respetivas categorias de impacto. Para cada categoria de impacto, é selecionado um indicador de categoria e posteriormente calculado. Os resultados dos indicadores concedem as informações dos parâmetros ambientais associados às entradas e saídas do sistema do produto (NBR ISO 14042).

A estrutura da AICV, segundo a norma ISO 14044, é constituída por uma série de elementos obrigatórios e de elementos opcionais, conforme se ilustra na Figura 3.4.

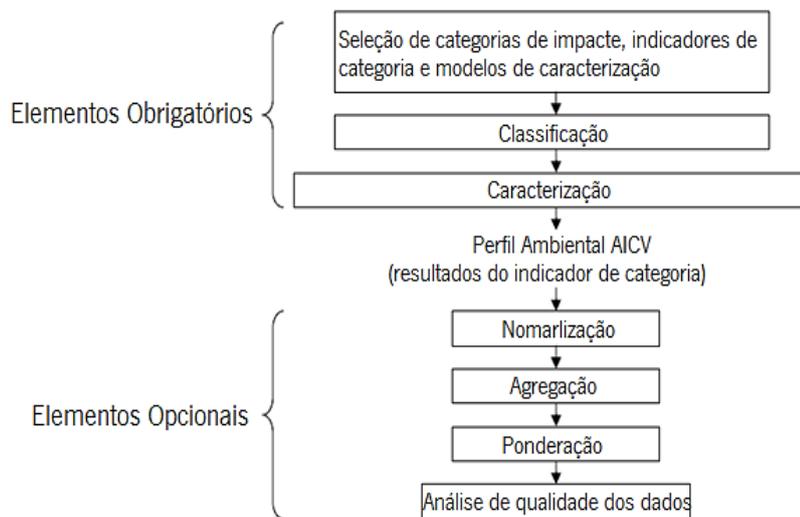


Figura 3.4 - Elementos constituintes da fase AICV (adaptado de Ferrão, 2004)

Segundo Silva (2014), os elementos obrigatórios são explícitos nos passos seguintes:

a) Seleção de categorias de impacto:

São definidos os impactos relevantes para o objetivo do estudo, através da indicação das categorias de impacto, indicadores de categorias e modelos de caracterização;

b) Classificação (correlação dos resultados do ICV):

Os fluxos elementares do ICV (por exemplo: o consumo de recursos naturais, de energia, as emissões atmosféricas ou para a água, entre outros) são classificados e atribuídos a categorias de impacto;

c) Caracterização (cálculo dos resultados dos indicadores de categoria):

Os resultados do ICV, dentro de cada categoria de impacto, são convertidos em indicadores, isto é, os resultados representados para cada categoria de impacto, são

quantificados e convertidos numa unidade comum a cada categoria de impacto, através da multiplicação de um fator de equivalência ou de caracterização.

Segundo a norma ISO 14044 (2006), os elementos opcionais são explícitos nos passos seguintes:

d) Normalização:

Os resultados da caracterização, os indicadores de categoria, são relacionados com uma referência comum, de modo a que haja uma melhor perceção do resultado de cada indicador do sistema de produto em estudo;

e) Agregação:

É feita uma correlação nas categorias de impacto num ou mais conjuntos pré-definidos na definição de objetivo e âmbito;

f) Ponderação:

É um processo de conversão dos indicadores das diferentes categorias de impacto, através do uso de fatores numéricos fundamentados na seleção de valores e não em pressupostos científicos;

g) Análise de qualidade de dados:

É um processo adicional que pode ser usado para melhor compreender a significância, a sensibilidade e a incerteza dos resultados da AICV.

Em síntese, os elementos obrigatórios convertem os resultados do ICV em resultados de indicador de categoria para as diferentes categorias de impacto e os elementos opcionais são úteis para normalizar, reunir e analisar os resultados do indicador de categorias (Ferreira, 2004).

Na Figura 3.5, está representado uma estrutura de AICV, onde se ilustra o conceito de indicadores de categoria com base na categoria de um mecanismo ambiental e é apresentada a categoria de impacto “acidificação” como exemplo. Cada categoria de impacto tem o seu próprio mecanismo ambiental (ISO 14044, 2006).

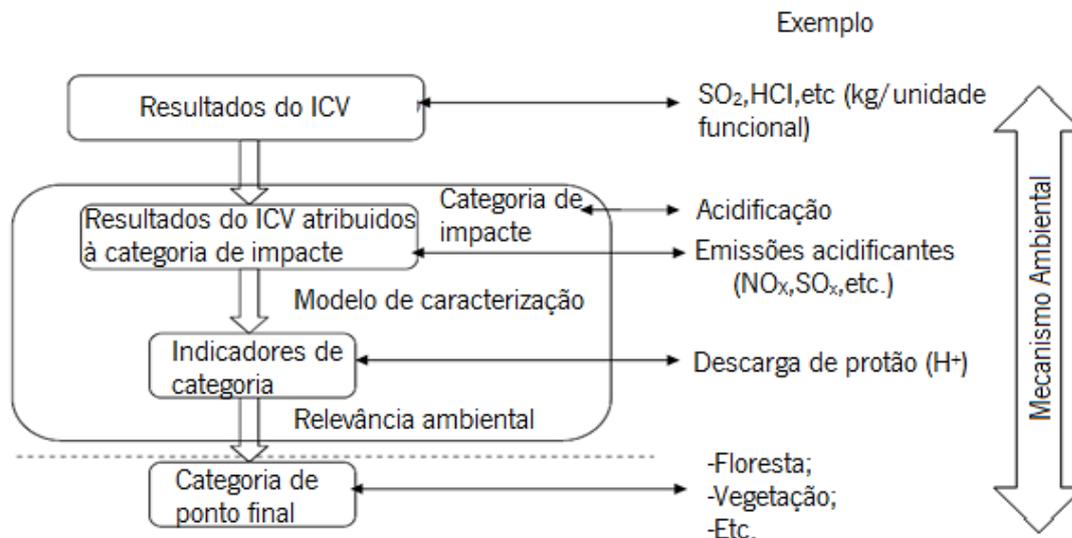


Figura 3.5 - Conceito de indicador de categoria (adaptado de Iso 14044, 2006)

### 3.3.4 Interpretação

A quarta e última fase de uma ACV consiste em analisar e interpretar os resultados provenientes das fases anteriormente estudadas, a análise do inventário do ciclo de vida e a avaliação dos impactos do ciclo de vida.

De conformidade com a Norma Iso 14044, a fase de interpretação deve incluir os seguintes parâmetros:

- Identificação de questões ambientais mais importantes com base nos resultados das fases ICV e AICV de uma ACV;
- Avaliação do estudo, incluindo a verificação da sensibilidade, da consistência e da integridade;
- Conclusões, recomendações e limitações.

Na identificação das questões significativas deve-se ter em conta o objetivo e âmbito definidos no estudo ACV, estas questões significativas podem ser, categorias dos dados do inventário, tais como, o consumo de recursos naturais, energia, as emissões atmosféricas, etc.

Na avaliação do estudo, deve-se estabelecer e reforçar a confiabilidade e segurança dos resultados da ACV, incluindo as questões significativas estudadas no parâmetro anterior. Dentro deste estudo, devem ser consideradas as três práticas seguintes:

- Análise da sensibilidade: avalia-se a credibilidade dos resultados e conclusões finais;

- Análise da consistência: determina-se se os pressupostos, os métodos e os dados são consistentes de acordo com o objetivo e âmbito da ACV;
- Análise da integridade: verifica-se se os dados e informações estão disponíveis e completos.

Nas conclusões, recomendações e limitações, devem constar as conclusões finais sobre o estudo conforme a informação pretendida na primeira fase da ACV, e as recomendações efetuadas devem estar em conformidade com as conclusões finais do estudo.

Na Figura 3.6 mostra-se a relação dos elementos constituintes da fase de interpretação com as restantes fases de um estudo ACV.

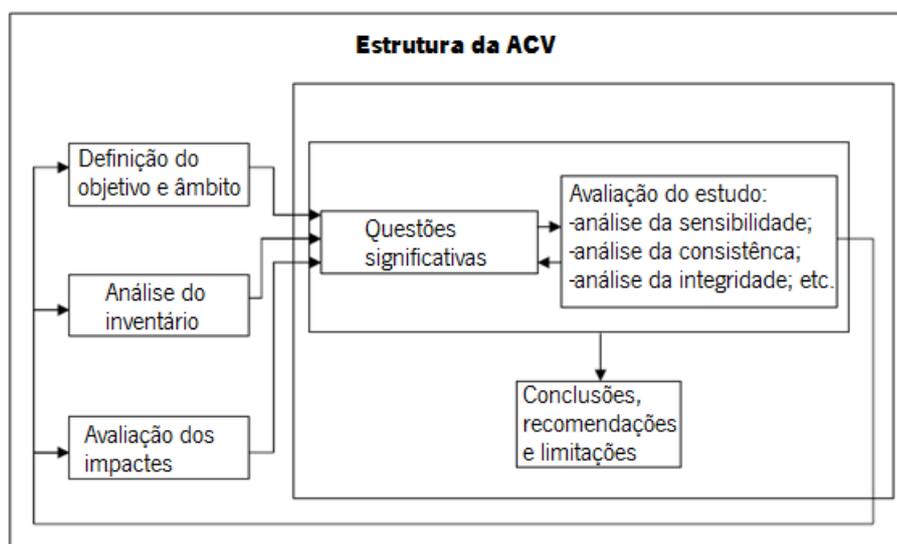


Figura 3.6 - Relação entre as fases de um estudo ACV (adaptado de ISO 14044, 2008)

### 3.4 Vantagens e limitações de um estudo ACV

Os resultados provenientes de uma ACV, e a sua posterior análise e interpretação, permitem tomar decisões importantes na seleção dos aspetos ambientais mais relevantes para a avaliação do desempenho de um processo, atividade ou produto ao longo do seu ciclo de vida.

A ACV é basicamente uma ferramenta científica quantitativa e qualitativa, que avalia todas as fases do ciclo de vida e tipos de impactos ambientais direcionados a um produto, com o propósito de analisar e interpretar os potenciais impactos associados ao seu ciclo de vida (Júnior et al., 2008).

Os dados resultantes de uma ACV em conjunto com outros fatores, tais como os dados referentes ao custo e desempenho de um produto, auxiliam a comunidade técnica na tomada de decisão na seleção

do produto com menor impacto ambiental e na saúde humana. Segundo EPA (2006), numa ACV é possível:

- Desenvolver uma avaliação sistemática das consequências associadas a um determinado produto;
- Analisar os balanços (ganhos/perdas) ambientais associados a um ou mais produtos/processos específicos de modo a que os responsáveis pela tomada de decisão (estado, comunidade, etc.) aceitem uma ação planeada;
- Quantificar as descargas ambientais para o ar, água e solo relativamente a cada fase do ciclo de vida e/ou processos que mais contribuem;
- Ajudar na identificação das significantes trocas de impactos ambientais entre as fases do ciclo de vida e o meio ambiente;
- Avaliar os efeitos humanos e ecológicos do consumo de materiais e descargas ambientais para a comunidade local, regional e mundial;
- Comparar os impactos ecológicos e na saúde humana entre dois ou mais produtos/processos rivais ou identificar os impactos de um produto ou processo específico;
- Identificar impactos numa ou mais áreas ambientais específicas de interesse.

Em contrapartida, um estudo ACV apresenta algumas limitações, devido ao facto de esta análise necessitar de muitos recursos e ser bastante morosa. A recolha de dados pode tornar-se complicada, dependendo do nível de rigor do estudo, e a disponibilidade de alguns dados pode afetar consideravelmente a precisão dos resultados finais. Portanto, é essencial considerar o tempo, a disponibilidade de dados e de recursos financeiros necessários para efetuar o estudo e balanceá-los com os aspetos positivos de uma ACV (EPA, 2006).

O estudo ACV não determina qual o processo/produto que funciona melhor ou o mais dispendioso, por isso, a informação desenvolvida num estudo ACV deve ser usada como uma componente de um processo de decisão que consiga interagir com outras componentes, tais como o desempenho e o custo (EPA, 2006).

Alcobia (2009) menciona outro tipo de desvantagem, que é o facto de que para se poder realizar uma ACV é necessário estabelecer contato e haver cooperação com os fornecedores e vendedores dos produtos e materiais. Refere ainda, que os acordos de confidencialidade a longo prazo que se estabelecem entre a companhia e os fornecedores e vendedores podem apresentar uma barreira no acesso aos dados necessários para desenvolver um estudo ACV.

Outra desvantagem é que um estudo ACV não inclui abordagens sobre possíveis acidentes nas fases do ciclo de vida de um produto/processo, ela apenas menciona os impactos associados à sua fabricação, ao seu uso e disposição final, isto é, ao seu ciclo de vida (ILCD, 2012).



## **Capítulo 4**

### **REFORÇO À FLEXÃO DE UMA VIGA DE BETÃO ARMADO**

#### **4.1 Considerações iniciais**

No decorrer deste capítulo serão apresentados diversos cálculos necessários para o dimensionamento de um reforço à flexão de uma viga de betão armado com sistemas de laminados CFRP de acordo com a técnica EBR e NSM, segundo as normas ACI Committee 440 (2008) e CNR- Italian National Research Council (CNR-DT 200/2004).

Serão também apresentados, cálculos referentes ao reforço da mesma viga com recursos à técnica tradicional de encamisamento parcial com adição de betão armado.

Os resultados dos cálculos de reforço à flexão realizaram-se com o intuito de criar uma base de dados para, no futuro, se realizar uma ACV dos mesmos. Visto que, devido à falta de informação sobre as técnicas de produção dos laminados de CFRP para a elaboração de uma ACV, não foi possível efetuar este estudo comparando as técnicas tradicionais com as que recorrem ao uso de CFRP.

Todavia, no final deste capítulo será feita uma análise comparativa com o propósito de poder avaliar qual a técnica mais eficiente.

#### **4.2 Apresentação do problema**

Um dos principais motivos para proceder com o reforço de uma viga de betão armado, é quando esta, deixa de apresentar a capacidade resistente para o qual foi dimensionada, ou ainda, quando lhe é aplicada uma sobrecarga adicional que excede os valores inicialmente previstos aquando do seu

dimensionamento, o que pode levar há ocorrência de fendilhação, deformação excessiva, ou até mesmo à rotura da mesma.

A necessidade de reforço à flexão da viga em estudo surgiu devido a uma modificação que ocorreu na edificação onde esta se insere, a qual levou a um incremento da sobrecarga de utilização, passando dos 10 kN/m iniciais para os 16 kN/m. O reforço foi efetuado com laminados de CFRP para as duas normas em análise, o ACI (2008) e CNR (2004).

As características da viga tipo, utilizada neste estudo, estão esquematicamente representadas na Figura 4.1 e nas Tabelas 4.1 e 4.2 que se seguem.

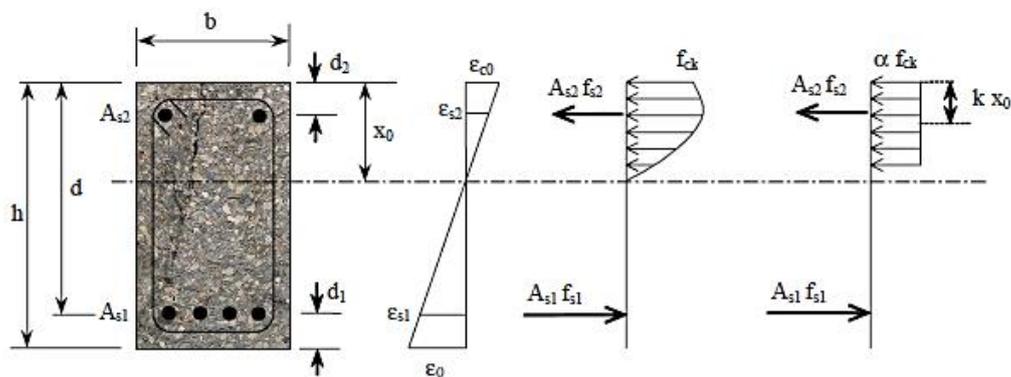


Figura 4.1 - Modelo da viga tipo em estudo

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas dos materiais constituintes da viga

Material	Propriedades	Valor
Betão	Classe	C25/30
	Classe	A400NR
Armaduras	Área em tração ( $A_{s1}$ )	4Ø25 (1963 mm <sup>2</sup> )
	Área em compressão ( $A_{s2}$ )	2Ø20 (628 mm <sup>2</sup> )
	CG: inferior ( $d1$ ) / superior ( $d2$ )	3,5 cm / 3 cm

Tabela 4.2 - Cargas atuantes na viga

Sobrecarga inicial ( $q_{k, inicial}$ )	10 (kN/m)
Sobrecarga final ( $q_{k, final}$ )	16 (kN/m)
Ação permanente inicial ( $g_{k, inicial}$ )	35 (kN/m)
Ação permanente final ( $g_{k, final}$ )	35 (kN/m)
$\Psi_0, \Psi_1, \Psi_2$	0.7, 0.5, 0.3

A presente viga, simplesmente apoiada com secção transversal retangular ( $b \times h / 0.3 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ ) e vão de 7 m, antes do aumento da sobrecarga cumpria todos os limites impostos pelo Eurocódigo 2 (EC2) no que respeita a estados limite últimos (ELU) e estados limite de utilização (ELS):

- Limitação das tensões;
- Controlo da fendilhação;
- Controlo da deformação.

Nota: Os cálculos efetuados para estas verificações encontram-se no anexo I.

### 4.3 Reforço com recurso à solução de encamisamento parcial com adição de betão armado

Como já foi referido no capítulo 2, a técnica de encamisamento consiste em aumentar a secção do elemento a reforçar através da adição de uma nova camada de betão e de armadura (Appleton e Gomes, 1997).

De acordo com Appleton e Gomes (1997) no caso específico do reforço à flexão de vigas, o dimensionamento pode realizar-se através do método dos coeficientes globais, admitindo-se um coeficiente de monolitismo para flexão de  $\gamma_{n,M} = 0,9$ . De acordo com este pressuposto, a determinação do momento fletor resistente ( $M_{rd}$ ) é efetuada admitindo que a secção tem um comportamento monolítico e, deste modo, o cálculo é semelhante ao de uma secção de betão armado, considerando-se duas camadas de armadura que podem ter resistências diferentes, como indicado na Figura 4.2.

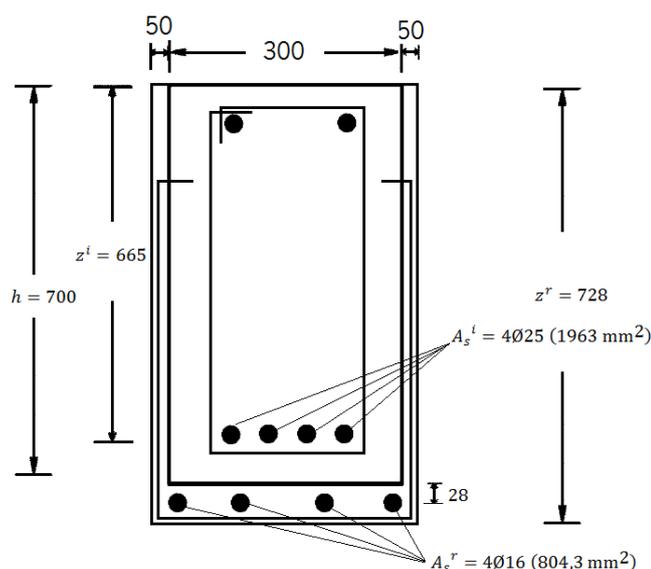


Figura 4.2 - Representação da viga tipo reforçada com a técnica de encamisamento de betão (C25/30)

O momento resistente da viga sem reforço é,

$$M_{Rd,sem\ reforço} = 407,44\ kN.m \quad [4.1]$$

(Nota: o procedimento de cálculo para a obtenção deste valor encontra-se no anexo I)

O momento solicitante na viga após o incremento da sobrecarga de utilização é dado por,

$$M_{Ed} = \frac{P_{Ed} \cdot L^2}{8} = 436,4\ kN.m \quad [4.2]$$

em que,

$$P_{Ed} = 1.35 \times 35 + 1.5 \times 16 = 71,25\ kN/m \quad [4.3]$$

$$l\ (vão\ da\ viga) = 7m \quad [4.4]$$

Visto que  $M_{Rd,sem\ reforço} \leq M_{Ed}$  foi necessário proceder com a técnica de encamisamento parcial com adição de betão armado para reforçar a viga em estudo, de modo a que esta apresentasse um momento resistente superior ao que lhe é solicitado. O novo momento resistente resultante da técnica de reforço tradicional é dado pela seguinte expressão,

$$M_{rd} = \gamma_{n,M} \{ A_s^{eq} z^{eq} f_{syd}^i = A_s^i z^i f_{syd}^i + A_s^r z^r f_{syd}^r \} \quad [4.5]$$

em que a área de armadura e a altura equivalente são obtidas através das seguintes expressões,

$$A_s^{eq} = A_s^i + A_s^r \frac{f_{syd}^r}{f_{syd}^i} = 3926\ mm^2 \quad [4.6]$$

$$z^{eq} = \frac{A_s^i \cdot z^i \cdot f_{syd}^i + A_s^r \cdot z^r \cdot f_{syd}^r}{A_s^i \cdot f_{syd}^i + A_s^r \cdot f_{syd}^r} \quad [4.7]$$

$$= \frac{1963 \cdot (0,9.665) \cdot 347,83 + 804,3 \cdot (0,9.728) \cdot 347,83}{1963 \cdot 347,83 + 804,3 \cdot 347,83} = 628,88\ mm \quad [4.8]$$

onde,

$$z^i = 700 - 35 = 665\ mm \quad [4.9]$$

$$z^r = 700 + 20 + 8 = 728\ mm \quad [4.10]$$

$$A_s^i = 4\emptyset 25\ (1963\ mm^2) \quad [4.11]$$

$$A_s^r = 4\emptyset 16\ (804,3\ mm^2) \quad [4.12]$$

$$f_{syd}^r = f_{syd}^i = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1.15} = 347,83\ MPa \quad [4.13]$$

Admitindo  $z \approx 0.9 \times d$  obtém-se,

$$M_{rd} = \gamma_{n,M} \times (A_s^{eq} \times 0.9d_{eq} \times f_{syd}^i) = 479,5 \text{ kN.m} \quad [4.14]$$

onde  $f_{syd}^i$  representa a tensão de cedência do aço da armadura existente.

$$M_{rd} \geq M_{Ed} \Leftrightarrow 479,5 \geq 436,4 \text{ [kN.m]} \quad [4.15]$$

Daqui conclui-se que o reforço adotado resiste ao momento solicitante na viga após o incremento da sobrecarga de utilização.

## 4.4 Reforço à flexão com recurso à técnica EBR

### 4.4.1 Recomendações ACI 440.2R-08 (2008)

O ACI em 2008 divulgou um documento designado por “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures” (ACI 440.2R-08, 2008), que como o seu nome indica, abrange recomendações para o projeto e construção de reforço de estruturas por colagem externa de materiais de matriz polimérica (FRP).

De seguida apresentam-se as metodologias de cálculo recomendadas pelo ACI 440 para o dimensionamento de reforço à flexão de um elemento estrutural.

Para o dimensionamento à flexão de vigas, o momento resistente é reduzido e deve ser superior ao momento solicitado, garantindo assim, o critério de segurança verificado pela seguinte expressão:

$$\emptyset \times M_n \geq M_u \quad [4.16]$$

em que,

$\emptyset$  - Fator de redução da resistência, relacionado com a ductilidade da seção;

$M_n$  - Momento fletor resistente da seção em estudo;

$M_u$  - Momento fletor solicitante da combinação mais desfavorável para análise.

Inicialmente, começa-se por determinar o valor de cálculo da resistência à tração do FRP ( $f_{fu}$ ) que é dado pelo produto do valor característico da resistência à tração ( $f_{fu}^*$ ) pelo fator de redução ambiental ( $C_E$  - Tabela 4.3), conforme indica a expressão seguinte,

$$f_{fu} = C_E \times f_{fu}^* \quad [4.17]$$

Em conformidade com a fórmula anterior, a extensão máxima do FRP ( $\varepsilon_{fu}$ ) é dada pelo produto do valor característico da extensão máxima no FRP ( $\varepsilon_{fu}^*$ ) pelo fator de redução ambiental.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \times \varepsilon_{fu}^* \quad [4.18]$$

Considerando que o material FRP apresenta comportamento linear elástico até à rotura, o módulo de elasticidade ( $E_f$ ) deste pode ser obtido pela lei de Hooke, indicada na equação seguinte,

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad [4.19]$$

Tabela 4.3 - Coeficiente de redução ambiental (adaptado de ACI 440.2R,2008)

Condições de exposição	Fibra e tipo de resina	Coeficiente de redução ambiental (CE)
Exposição exterior	Carbono/Epóxi	0.95
	Vidro/Epóxi	0.75
	Aramida/Epóxi	0.85
Exposição exterior (pontes, portos e garagens fechadas)	Carbono/Epóxi	0.85
	Vidro/Epóxi	0.65
	Aramida/Epóxi	0.75
Ambiente agressivo (Ataque químico e estações de tratamento de esgoto)	Carbono/Epóxi	0.85

Para evitar o descolamento antecipado do FRP, a máxima extensão que o FRP pode ser submetido é limitada ao valor dado pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \times \sqrt{\frac{f_c}{n \times E_f \times t_f}} \leq 0.9 \times \varepsilon_{fu} \quad [4.20]$$

em que,

$f_c$  - Resistência característica à compressão do betão;

$n$  - Número de camadas de reforço de FRP;

$E_f$  - Módulo de elasticidade do FRP;

$t_f$  - Espessura de cada camada de reforço de FRP;

$\varepsilon_{fu}$  - Extensão de rotura do reforço de FRP.

Cruz et al. (2011) afirma que, baseado em resultados obtidos em investigações experimentais, quanto maior for a rigidez do reforço ( $n \times E_f \times t_f$ ), maior é a probabilidade de ocorrência de rotura por destacamento, pelo que, como se pode verificar pela expressão anterior,  $\varepsilon_{fd}$  está relacionada com a rigidez do reforço. Descrevem também que a investigação experimental tem divulgado que o uso de muitas camadas de FRP é um método dispendioso, visto que quanto maior for o número de camadas de FRP menor será a eficiência do reforço, levando à rotura na interface do betão do substrato-FRP para níveis de tensão no FRP bastante inferiores em comparação aos valores de resistência que este material detém.

A estimativa da profundidade do eixo neutro ( $c$ ), geralmente esta é obtida pela seguinte expressão,

$$c = 0.20 \times d \quad [4.21]$$

em que,

$d$  - profundidade da face mais comprimida do betão em relação ao centro geométrico da armadura.

A extensão no reforço de FRP ( $\varepsilon_{fe}$ ) é calculada conforme a equação [4.22], sendo esta formula fundamental para posteriormente se determinar a tensão efetiva no FRP.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \times \left( \frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad [4.22]$$

em que,

$\varepsilon_{cu}$  - Extensão última do betão;

$\varepsilon_{bi}$  - Extensão no substrato do betão no momento da aplicação do reforço de FRP;

$h$  - Distância da face mais comprimida do betão em relação ao centro geométrico do FRP;

$c$  - Profundidade do eixo neutro;

A extensão na armadura ( $\varepsilon_s$ ) é obtida através da compatibilidade das extensões, como demonstra a equação seguinte,

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad [4.23]$$

A tensão efetiva no reforço de FRP,  $f_{fe}$ , é determinada a partir do nível de deformação no FRP ( $\varepsilon_f$ ), admitindo-se um comportamento perfeitamente elástico.

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe} \quad se \quad \varepsilon_f < \varepsilon_{fd} \quad [4.24]$$

$$f_{fe} = 0 \quad se \quad \varepsilon_f \geq \varepsilon_{fd} \quad [4.25]$$

A tensão no aço,  $f_s$ , é determinada a partir do nível da extensão na armadura usando a curva tensão - extensão da equação.

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s \quad se \quad \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \quad [4.26]$$

$$f_s = f_{sy} \quad se \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \quad [4.27]$$

em que,

$E_s$  - Módulo de elasticidade do aço;

$\varepsilon_s$  - Extensão no aço;

$f_{sy}$  - Tensão de cedência do aço.

Uma vez já demonstrados os processos de cálculo para se determinar o nível de extensão, da tensão no reforço do FRP e do aço para profundidade do eixo neutro ( $c$ ) arbitrada, do equilíbrio de forças internas resulta uma nova avaliação da posição do eixo neutro, através da seguinte equação,

$$c = \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe}}{\alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times b} \quad [4.28]$$

em que,

$A_s$  - Área da armadura de tração;

$A_f$  - Área do reforço de FRP.

Os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  da equação [4.28], estão relacionados com o diagrama do bloco retangular de tensão no betão, equivalente à distribuição não linear de tensões. Os valores calculados e arbitrados para  $c$  são comparados. Se estes forem iguais (a menos de uma tolerância pré-definida), o valor de  $c$  deve ser adotado. Caso contrário, deverá ser feita uma nova estimativa de  $c$ , e o processo é repetido até se obter a respetiva convergência.

A Figura 4.3 ilustra a distribuição de tensões e extensões utilizadas pelo ACI 440 para o cálculo do momento resistente na verificação dos ELU. Tendo em conta esta distribuição, o momento fletor resistente, em ELU, pode ser calculado segundo a expressão seguinte:

$$M_n = A_s \times f_s \times \left( d - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) + \Psi_f \times A_f \times f_{fe} \times \left( h - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) \quad [4.29]$$

em que,

$A_s$  - Área da armadura convencional de tração existente na secção;

$f_s$  - Tensão de tração no aço;

$h$  e  $d$  - São a distância do FRP e da armadura à face superior da secção, respetivamente;

$\beta_1$  - Fator de transformação do diagrama de tensões, podendo-se assumir 0.8;

$c$  - Posição do eixo neutro (linha neutra);

$\Psi_f$  - Coeficiente de redução da resistência do FRP. Na flexão, de acordo com ACI 440.2R (2008), pode-se adotar o valor de 0.85;

$A_f$  - Área de FRP;

$f_{fe}$  - Tensão de tração efetiva no FRP.

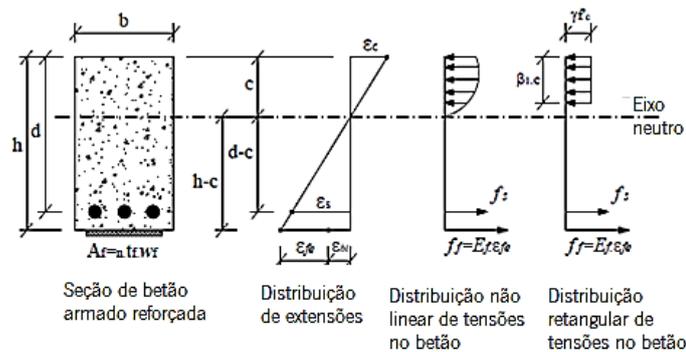


Figura 4.3 - Distribuição de tensões e extensões numa seção (adaptado de ACI 440.2r-02,2002)

De acordo com este procedimento foram efetuados os cálculos para o dimensionamento do reforço à flexão em estados limite últimos da viga tipo em análise, que é apresentada na Figura 4.4.

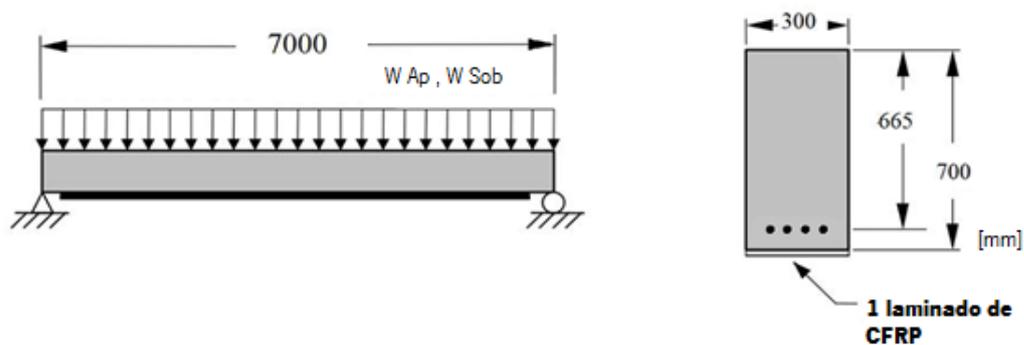


Figura 4.4 - Geometria da viga tipo em estudo (adaptado de Cruz et al., 2011)

Na Tabela 4.4 apresentam-se as características gerais da viga tipo estudada e na Tabela 4.5 apresentam-se as ações que a viga vai estar sujeita e os seus respetivos momentos solicitantes.

Tabela 4.4 - Principais características da viga em estudo (adaptado de ACI, 2008)

Comprimento da viga (l)	7000 m
Largura da viga (b)	300 mm
$d_s$	665 mm
h	700 mm
$f'_c$	25 MPa
$f_{yd}$	347,83 MPa
$M_{rd}$ (momento resistente da viga não reforçada)	407,435 kN.m
Área de armadura em tração ( $A_{s1}$ )	4Ø25 (1963 mm <sup>2</sup> )

Tabela 4.5 - Ações a que está sujeita a viga tipo e os seus momentos correspondentes (adaptado de ACI, 2008)

<b>Ação/momento</b>	<b>Iniciais</b>	<b>Finais</b>
$W_{AP}$ (ações permanentes)	35 kN/m	35 kN/m
$W_{SOB}$ (sobrecarga)	10 kN/m	16 kN/m
WAP+WSOB (cargas não majoradas)	45 kN/m	51 kN/m
Combinação 1 ( $1.1W_{AP}+0.75W_{sob}$ )	N/A	50,5 kN/m
Combinação 2 ( $1.2W_{AP}+1.6W_{sob}$ )	58 kN/m	67,6 kN/m
Momento devido ao peso próprio ( $M_{AP}$ )	214 kN.m	214,375 kN.m
Momento devido à sobrecarga ( $M_{sob}$ )	61 kN.m	98 kN.m
Momento para a carga de serviço ( $W_s$ )	276 kN.m	312 kN.m
Momento da combinação 1 ( $1.1M_{AP}+0.75M_{sob}$ )	N/A	309,3125 kN.m
Momento da combinação 2 ( $M_U$ ) ( $1.2M_{AP}+1.6M_{sob}$ )	355 kN.m	414,05 kN.m

Optou-se por reforçar a viga com um laminado de CFRP presente nas tabelas disponibilizadas pela empresa S&P, com dimensões e características apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características fundamentais do laminado de CFRP

$t_f$ (espessura do CFRP)	1,4 mm
$b_f$ (largura do CFRP)	150 mm
$d_f$ (altura útil do CFRP)	700 mm
$f_{fu}^*$ (resistência última à tração do laminado)	2000 MPa
$\varepsilon_{fu}^*$ (extensão de rotura)	0,01212
$E_f$ (módulo de elasticidade)	165 GPa

Na Tabela 4.7 são expostos os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de reforço à flexão de acordo com a norma ACI (2008) recorrendo a técnica EBR com a aplicação do laminado de CFRP anteriormente referido.

Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (adaptado de ACI, 2008)

Procedimentos	Operações
<p><b>1º passo: calcular as propriedades de cálculo do sistema de FRP</b></p> <p>A viga está localizada no interior de um edifício e será utilizado um laminado de CFRP. De acordo com a Tabela 4.3, <math>C_E=0,95</math>.</p> $f_{fu} = C_E \times f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \times \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = 0,95 \times 2000 = 1900 \text{ N/mm}^2$ $\varepsilon_{fu} = 0,95 \times 0,01212 = 0,0115 \text{ N/mm}^2$
<p><b>2º passo: cálculos preliminares</b></p> <p>Propriedades do betão:</p> $E_c = 31 \text{ GPa}$ <p>Propriedades do aço:</p> $\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$ <p>Propriedades do FRP:</p> $A_f = n \cdot t_f \cdot b_f$ $\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d_f}$ <p>em que,</p> $d_f = h$	$A_s = 1963 \text{ mm}^2$ $\rho_s = \frac{1963}{300 \times 665} = 0,00984$ $A_f = 1 \times 1,4 \times 150 = 210 \text{ mm}^2$ $\rho_f = \frac{210}{300 \times 700} = 0,001$

Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>3º passo: calcular as propriedades de cálculo do sistema de FRP</b></p> <p>O estado de extensão existente no substrato é calculado assumindo que a viga está em fase fendilhada, e que, no momento da aplicação do reforço, apenas atuam as ações permanentes. Da análise da secção fendilhada obtém-se <math>k = 0,2985</math> e <math>I_{cr} = 3538 \times 10^6</math>.</p> $\varepsilon_{bi} = \frac{M_{AP}(d_f - kd_s)}{I_{cr}E_c}$	$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right)}$ $k = \sqrt{\left(0,00984 \frac{200}{31}\right)^2 + 2\left(0,00984 \frac{200}{31}\right) - \left(0,00984 \frac{200}{31}\right)}$ $= 0,2985$ $I_{cr} = \frac{b \cdot d_s^3}{3} \cdot k^3 + \frac{E_s}{E_c} A_s \cdot d_s^2 (1 - k)^2 = 3538 \times 10^6$ $\varepsilon_{bi} = \frac{214000 \times (700 - 0,2985 \times 665)}{3538 \times 10^3 \times 31} = 0,00098$
<p><b>4º passo: determinar a extensão máxima do FRP</b></p> <p>O valor de <math>\varepsilon_{fd}</math> é obtido através da equação 4.20.</p> <p>Então, <math>\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{n \cdot E_f \cdot \xi_f}} \leq 0,9 \times \varepsilon_{fu}</math></p>	$\varepsilon_{fd} = 0,41 \times \sqrt{\frac{25}{1 \times 165000 \times 1,4}} \leq 0,9 \times \varepsilon_{fu}$ $\varepsilon_{fd} = 0,0043 \leq 0,01035 (0,9 \times 0,0115)$
<p><b>5º passo: determinar a extensão máxima do FRP</b></p> <p>Considerar <math>c = 0,20d</math> é uma estimativa inicial razoável. O valor de <math>c</math> é ajustado após verificação do equilíbrio.</p> $c = 0,20 \times d$	$c = 0,20 \times 665 = 133 \text{ mm}$

Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>6º passo: determinar a extensão efetiva no FRP</b></p> <p>A extensão efetiva é calculada através da equação 4.22,</p> $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \times \left( \frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$ <p>É de salientar que, para a posição de eixo neutro selecionada, o modo de rotura é por cedência do FRP, dado que é a parcela da direita que controla. Caso contrário, o modo de rotura seria por esmagamento do betão.</p> <p>Dado que o FRP controla a rotura da secção, a extensão no betão em rotura deverá ser inferior a 0.003 e pode ser calculada por intermédio da seguinte equação,</p> $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left( \frac{c}{d_f - c} \right)$	$\varepsilon_{fe} = 0,003 \times \left( \frac{700 - 133}{133} \right) - 0,00098 \leq 0,0043$ $\varepsilon_{fe} = 0,0118 \leq 0,0043 \text{ não verifica}$ <p>então <math>\varepsilon_{fe} = 0,0043</math></p> $\varepsilon_c = (0,0043 + 0,00098) \times \left( \frac{133}{700 - 133} \right) = 0,0012$
<p><b>7º passo: calcular a extensão nas armaduras existentes</b></p> <p>A extensão na armadura é dada por a equação 4.23,</p> $\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$	$\varepsilon_s = (0,0043 + 0,00098) \times \left( \frac{665 - 133}{700 - 133} \right) = 0,005$
<p><b>8º passo: calcular a tensão nas armaduras existentes e no FRP</b></p> $f_s = E_s \times \varepsilon_s \leq f_{yd}$ $f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe}$	$f_s = 200000 \times 0,005 = 984,34 \text{ N/mm}^2$ $f_s = 984,34 > 347,83 \text{ não verifica}$ <p>então <math>f_s = 347,83 \text{ N/mm}^2</math></p> $f_{fe} = 165000 \times 0,0043 = 703,8 \text{ N/mm}^2$

Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>9º passo: calculo das forças internas e verificação do equilíbrio</b></p> <p>Os parâmetros <math>\beta_1</math> e <math>\alpha_1</math> podem ser calculados de forma mais refinada segundo as recomendações do ACI 318-05:</p> $\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c}$ $\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1(\epsilon'_c)^2}$ <p>em que,</p> $\epsilon'_c = \frac{1,7f'_c}{E_c}$ <p>A verificação do equilíbrio é efetuada calculando <math>c</math> segundo a equação 4.28 e comparando o valor obtido com o estimado no passo nº5.</p> $c = \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe}}{\alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times b}$	$\epsilon'_c = \frac{1,7 \times 25}{31} = 0,0014$ $\beta_1 = \frac{4 \times 0,0014 - 0,0012}{6 \times 0,0014 - 2 \times 0,0012} = 0,74$ $\alpha_1 = \frac{3 \times 0,0014 \times 0,0012 - 0,0012^2}{2 \times 0,74(0,0014)^2} = 0,85$ $c = \frac{1963 \times 347,83 + 210 \times 703,8}{0,85 \times 25 \times 0,74 \times 300} = 176,06 \text{ mm}$ $c = 176,06 \text{ mm} \neq 133 \text{ mm}$ <p>∴ Não se obteve convergência, visto isto, prosseguir com o 10º passo.</p>
<p><b>10º passo: ajustar o valor de c até ser garantido o equilíbrio</b></p> <p>Os passos 6 a 9 são repetidos o número de vezes necessário com diferentes valores de <math>c</math> até se encontrar o equilíbrio. Os resultados da última iteração resumem-se de seguida:</p> $c = 158 \text{ mm}$ $\epsilon_s = 0,005$ $f_s = f_{yd} = 347,83 \text{ MPa}$ $f_{fe} = 703,8 \text{ MPa}$ $\beta_1 = 0,77$ $\alpha_1 = 0,91$	$c = \frac{1963 \times 347,83 + 210 \times 703,8}{0,85 \times 25 \times 0,74 \times 300} = 158 \text{ mm}$ <p>∴ Verifica-se convergência o valor adotado para <math>c</math> está correto.</p>

Tabela 4.7 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>11º passo: cálculo do momento resistente</b></p> <p>O valor de cálculo do momento resistente determina-se segundo a equação 4.29. Um fator adicional de segurança, <math>\Psi_f = 0,85</math>, aplica-se à parcela relativa à contribuição do FRP. Como, <math>\varepsilon_s = 0,005 \geq 0,005</math> deve-se aplicar um fator de redução da resistência, <math>\phi = 0,90</math>, na equação 4.29 que se segue,</p> $M_n = \phi \cdot \left[ A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right]$	$M_n = 0,90 \times \left[ 1963 \times 347,83 \times \left( 665 - \frac{0,74 \times 165,5}{2} \right) + 0,85 \times 210 \times 488,78 \times \left( 700 - \frac{0,74 \times 165,5}{2} \right) \right]$ $M_n = 443,81 \text{ kN.m} > M_{u1} = 414 \text{ kN.m}$ <p>∴ O momento resistente é superior ao momento máximo para a configuração de carregamento da estrutura reforçada.</p>

O reforço da viga não será efetuado ao longo de todo o seu comprimento longitudinal, pois não constitui uma solução económica. Sendo assim, os laminados de CFRP serão apenas aplicados nas secções onde a capacidade resistente inicial da viga é ultrapassada. Além dessas secções é necessário considerar também o comprimento de amarração dos laminados.

De seguida, apresentam-se os cálculos efetuados para a obtenção do comprimento total do laminado de CFRP (Figura 4.5) inserido na viga através da técnica EBR.

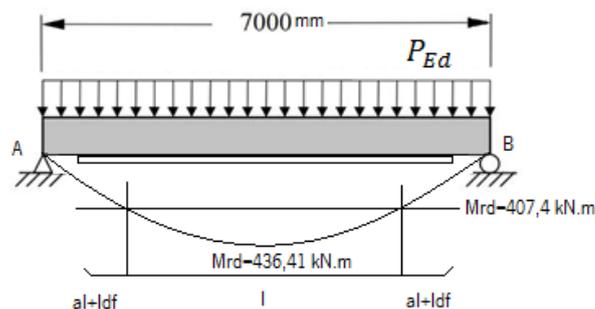


Figura 4.5 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP

$$P_{Ed} = 1,2 \cdot g_k \cdot f + 1,6 \cdot q_k \cdot f \quad [4.30]$$

$$\Leftrightarrow P_{Ed} = 1,2 \times 35 + 1,2 \times 16 = 67,6 \text{ kN.m} \quad [4.31]$$

$$\sum M_A = 0 \Leftrightarrow -67,6 \times \frac{7^2}{2} + 7 \times V_B \Leftrightarrow V_B = 236,6 \text{ kN} \quad [4.32]$$

A determinação do comprimento dos laminados ( $l$ ), é dada pela equação dos momentos apresentada pela expressão seguinte,

$$M_{(x)} = 236,6 \cdot x - \frac{67,6 \cdot x^2}{2} \quad [4.33]$$

Onde o valor máximo do momento solicitante é dado por,

$$M_{(3,5)} = 236,6 \cdot 3,5 - \frac{67,6 \cdot 3,5^2}{2} = M_{Ed} = 414,05 \text{ kN.m} \quad [4.34]$$

$$407,4 = 236,6 \times x - \frac{67,6 \times x^2}{2} \Leftrightarrow x \simeq 3,05 \text{ m} \wedge x = 3,94 \text{ m} \quad [4.35]$$

Então,

$$l = 7 - (2 \times 3,05) = 0,9 \text{ m} \quad [4.36]$$

Após a realização dos cálculos e análise dos mesmos conclui-se que é necessário reforçar a viga com laminados de CFRP com 1,8 m de comprimento longitudinal. Contudo, a norma ACI (2008) recomenda que se calcule um comprimento de amarração ( $l_{df}$ ), que posteriormente é somado ao valor do comprimento longitudinal anteriormente calculado.

De acordo o ACI (2008) o comprimento de amarração do laminado inserido através da técnica EBR é dado por,

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n \times E_f \times t_f}{\sqrt{f_c}}} = \sqrt{\frac{1 \times 165000 \times 1,4}{\sqrt{25}}} = 214,94 \text{ mm} \quad [4.37]$$

$$a_l = \frac{0,9 \cdot h \cdot (\cot \theta - \cot \alpha)}{2} = \frac{0,9 \times 700 \times (\cot 45^\circ - \cot 90^\circ)}{2} = 315 \text{ mm} \quad [4.38]$$

Sendo assim, comprimento total utilizado na direção longitudinal na viga segundo a técnica EBR é dado por,

$$l_{EBR} = 0,9 + 2 \times 214,94 \times 10^{-3} + 2 \times 315 \times 10^{-3} = 1,95 \simeq 2,0 \text{ m} \quad [4.39]$$

#### 4.4.2 Recomendações CNR-DT 200 (2004)

A norma CNR considera quatro modos de rotura, o descolamento nas extremidades do FRP, o descolamento ao longo do FRP, a rotura do reforço de FRP e por último a rotura por esmagamento do betão com cedência do aço à tração. Salaria também, que ao se fazer uma limitação nos valores de cálculo das tensões e deformações do FRP, para a determinação do momento resistente, é possível evitar os dois primeiros modos de rotura mencionados anteriormente.

Nos procedimentos de cálculo que se seguem são utilizadas as características admitidas para a viga tipo referenciada na secção anterior.

No cálculo do momento fletor resistente ( $M_{Rd}$ ) para os estados limite últimos, a norma italiana CNR recomenda a limitação da extensão máxima no FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , ao menor dos valores dados pela expressão seguinte,

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \times \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} = 0,0031 \quad [4.40]$$

em que,

$\varepsilon_{fk}$  - Valor característico da extensão máxima no FRP;

$\eta_a$  - Fator corretivo que traduz os efeitos das condições ambientais (igual ao coeficiente de redução ambiental (CE) adotado pelas recomendações do ACI e é especificado na Tabela 4.3);

$\gamma_f$  - Coeficiente parcial de segurança (Tabela 4.8);

$\varepsilon_{fdd}$  - Extensão que corresponde ao início do deslocamento do FRP, e é obtida através da seguinte expressão,

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} = 0,0031 \quad [4.41]$$

em que,

$E_f$  - Módulo de elasticidade do FRP.

$f_{fdd,2}$  - Tensão última de tração no FRP considerando a rotura por deslocamento intermédio do FRP. Esta tensão é calculada através do produto de um coeficiente de eficiência,  $k_{cr}$ , que adquire o valor de 3,0 quando não é conhecido o valor de cálculo da tensão última de tração no FRP considerando a rotura por descolamento nas extremidades do reforço,  $f_{fdd}$ .

Sendo assim, o valor da tensão última de tração é dado por,

$$f_{fda,2} = k_{cr} \times f_{fda} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{f,d} \times \sqrt{\gamma_c}} \times \sqrt{\frac{2 \times E_f \times \Gamma_{Fk}}{t_f}} \quad [4.42]$$

$$\Leftrightarrow f_{fda,2} = \frac{3}{1,2 \times \sqrt{1,5}} \times \sqrt{\frac{2 \times (16000 \times 0,95) \times 0,253}{1,4}} = 485.496 \text{ MPa} \quad [4.43]$$

em que,

$\gamma_{f,d}$  e  $\gamma_c$  - São coeficientes parciais do FRP (Tabela 4.8) e do betão, respetivamente;

$t_f$  - Espessura do reforço de FRP;

$\Gamma_{Fk}$  - Valor característico da energia de fratura da interface betão-FRP, e é obtida através da seguinte expressão,

$$\Gamma_{Fk} = 0.03 \times k_b \times \sqrt{f_{ck} \times f_{ctm}} = 0.03 \times 1,045 \times \sqrt{25 \times 2,6} = 0.253 \quad [4.44]$$

em que,

$f_{ck}$  - Resistência característica do betão à compressão;

$f_{ctm}$  - Valor médio da resistência à tração do betão;

$k_b$  - Fator geométrico, e é obtido através da seguintes expressão,

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} = \sqrt{\frac{2 - \frac{150}{300}}{1 + \frac{150}{400}}} = 1.045 \quad \wedge \quad \frac{b_f}{b} \geq 0.33 \quad [4.45]$$

em que,

$b_f$  - Largura do FRP;

$b$  - Largura da seção transversal.

Tabela 4.8 - Coeficientes de parciais de segurança para os sistemas de FRP (adaptado de CNR,2004)

Modos de rotura	Coeficiente de segurança	Aplicação de sistemas certificados globalmente	Aplicação de sistemas certificados produto a produto
Rotura do FRP	$\gamma_f$	1,10	1,25
Descolamento do FRP	$\gamma_{f,d}$	1,20	1,50

Uma vez determinada a extensão máxima no FRP, procede-se com o próximo passo que consiste na determinação do tipo de modo de rotura que ocorrerá no sistema de reforço de FRP quando sujeito à flexão. Na figura 4.6 é possível observar os dois tipos de modo de rotura que podem ocorrer na região 1 caso a extensão máxima no FRP ( $\epsilon_{fd}$ ) seja alcançada ou na região 2 caso a extensão última do betão à compressão ( $\epsilon_{cu}$ ) seja alcançada.

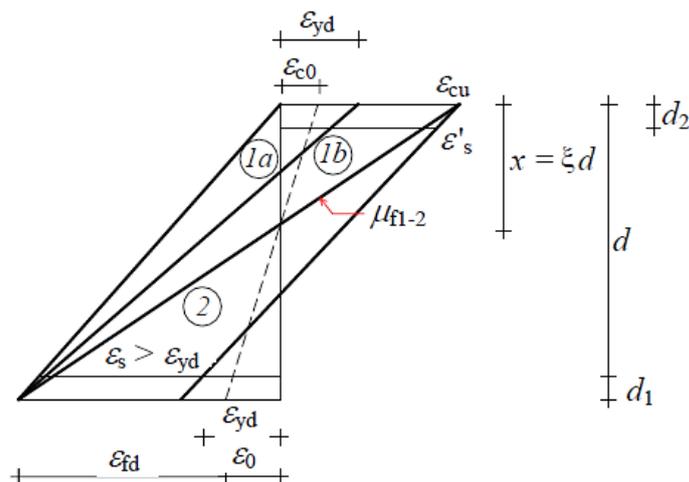


Figura 4.6 - Modos de rotura para elementos de betão reforçados com FRP (CNR 2004)

Para identificar o modo de rotura para este caso particular, é calculada a seguinte relação mecânica ( $\mu_f$ ),

$$\mu_f = \frac{b_f \times (n_f \times t_{f,1}) \times f_{fdd,2}}{\bar{f}_{cd} \times b \times d} \quad [4.46]$$

$$\Leftrightarrow \mu_f = \frac{150 \times (1 \times 1,4) \times 485.496}{16,667 \times 300 \times 665} = 0.029 \quad [4.47]$$

em que,

$b_f$  - Largura do FRP;

$n_f$  - Número de camadas de FRP;

$t_{f,1}$  - Espessura do FRP;

$\overline{f_{cd}}$  - Valor de cálculo igual à resistência de compressão do betão ( $f_{cd}$ );

$b$  e  $d$  - São a largura e a altura do elemento reforçado com FRP, respetivamente.

Para posteriormente ser comparada com a relação mecânica ( $\mu_{f1-2}$ ), o seu processo de cálculo é mostrado de seguida,

$$\mu_{f1-2} = \frac{0.8 \times \varepsilon_{cu} \times \frac{h}{d}}{\varepsilon_{cu} \times \varepsilon_{fd} \times \varepsilon_0} - \mu_s \times (1 - u) \quad [4.48]$$

$$\Leftrightarrow \mu_{f1-2} = \frac{0.8 \times 0,0035 \times \frac{700}{665}}{0,0035 \times 0,205 \times 0,0029} - 0,205 \times \left(1 - \frac{628}{1963}\right) = 0.172 \quad [4.49]$$

em que,

$u$  - Representa a relação entre o aço à compressão e o aço à tração ( $A_{s2}/ A_{s1}$ );

$\mu_s$  - Representa a relação mecânica relacionada com o sistema de reforço com aço, e é obtido através da seguinte expressão,

$$\mu_s = \frac{A_{s1} \times f_{yd}}{\overline{f_{ccd}} \times b \times d} = \frac{1963 \times 347,83}{25 \times 300 \times 665} = 0.205 \quad [4.50]$$

$\varepsilon_0$  - Tensão no estado inicial do betão, e é obtida através da seguinte expressão,

$$\varepsilon_0 = \frac{M_{gk}}{0.9 \times d \times E_s \times A_{s2}} = \frac{\left(\frac{35 \times 7^2}{8}\right) \times 10^3}{0.9 \times 665 \times 200 \times 628} = 0.0029 \quad [4.51]$$

em que,

$M_{gk}$  - Momento devido as cargas permanentes em ELS.

Para identificar a região da rotura deve-se comparar a expressão  $\mu_f$  com a expressão  $\mu_{f1-2}$ . Se o valor de cálculo resultante da expressão  $\mu_f \leq \mu_{f1-2}$ , o modo de rotura dá-se na região 1, caso contrário, quando  $\mu_f > \mu_{f1-2}$ , o modo de rotura dá-se na região 2.

Quando o modo de rotura ocorre na região 1, dá-se a rotura do sistema de FRP. Esta rotura é provocada quando a extensão máxima do FRP é alcançada. A distribuição das extensões ao longo da secção transversal deverá ser linear, de modo a satisfazer os requisitos exigidos pela CNR apresentados anteriormente. As restantes extensões devem ser calculadas de acordo com as expressões seguintes:

– FRP: 
$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fd} \tag{4.52}$$

– Betão (compressão): 
$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x}{h - x} \leq \varepsilon_{cu} \tag{4.53}$$

– Aço (compressão): 
$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{x - d_2}{h - x} \tag{4.54}$$

– Aço (tração): 
$$\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d - x}{h - x} \tag{4.55}$$

em que,

$x$  – Posição do eixo neutro. O valor deste é quantificado pela distância entre a posição do eixo neutro e a fibra mais comprimida da secção transversal (Figura 4.7).

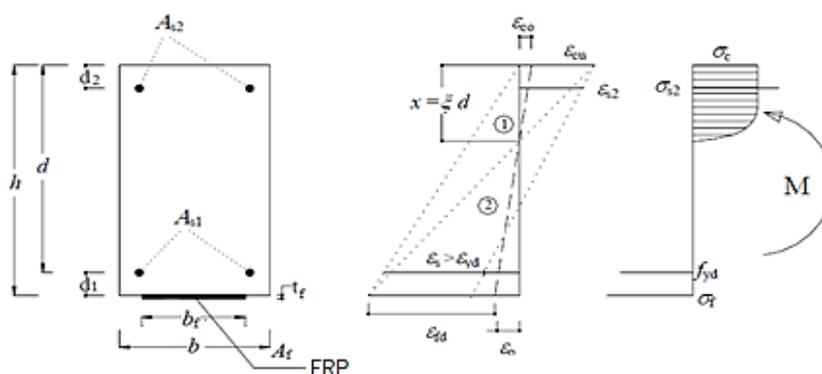


Figura 4.7 - Esquema de uma secção transversal reforçada com FRP e os seus diagramas de extensão e equilíbrio de forças (adaptado de CNR,2004)

No caso do modo de rotura ocorrer na região 2, devido ao facto desta ter acontecido pelo efeito do esmagamento do betão com a cedência das armaduras em tração, a distribuição das extensões ao longo da secção transversal também deverá ser linear, para cumprir requisitos exigidos pela CNR apresentados anteriormente. As restantes extensões devem ser calculadas de acordo com as expressões seguintes:

– FRP: 
$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd} \tag{4.56}$$

– Betão (compressão): 
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \tag{4.57}$$

$$- \text{ Aço (compressão): } \quad \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x} \quad [4.58]$$

$$- \text{ Aço (tração): } \quad \varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x} \quad [4.59]$$

Uma vez conhecido o modo de rotura, que na viga em estudo ocorreu na região 1, é possível determinar a posição do eixo neutro da viga, e esta, é obtida através da expressão resultante do equilíbrio de forças ao longo do eixo da viga,

$$0 = \psi \times b \times x \times f_{cd} + A_{s1} \times f_{yd} - A_f \times \sigma_f \Leftrightarrow x = 0.17 \text{ m} \quad [4.60]$$

Por fim, é possível determinar o momento resistente da viga reforçada com um laminado de CFRP (largura -150 mm  $\times$  espessura -1.4 mm) através da expressão seguinte,

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot [\psi b x f_{cd} (d - \lambda x) + A_{s1} f_{yd} (d - d_2) - A_f \sigma_f d_f] = 476.5 \text{ kN.m} \quad [4.61]$$

em que,

$\gamma_{Rd}$  - Coeficiente parcial para o modelo de resistência, deve ser assumido com o valor de 1,0;

$\psi$  e  $\lambda$  - Coeficientes não dimensionais, representam a resultante das tensões e a distância da fibra mais afastada à compressão, respetivamente. Em que através do livro de P. Jimenez Montoya obtiveram-se estes valores, sendo  $\psi = 0,6881$  e  $\lambda = 0,416$ ;

$d_2$  - Distância de recobrimento da armadura à compressão.

A viga tipo reforçada com o laminado de CFRP (150 mm  $\times$  1.4 mm) resiste ao momento solicitante, como se pode verificar pela seguinte equação,

$$M_{Rd} \geq Med \Leftrightarrow 476.5 \text{ kN.m} \geq 436.41 \text{ kN.m} \quad [4.62]$$

O reforço da viga não será efetuado ao longo de todo o seu comprimento longitudinal, pois não constitui uma solução económica. Sendo assim, os laminados de CFRP serão apenas aplicados nas secções onde a capacidade resistente inicial da viga é ultrapassada. Além dessas secções é necessário considerar também o comprimento de amarração dos laminados.

De seguida, apresentam-se os cálculos efetuados para a obtenção do comprimento total do laminado de CFRP (Figura 4.8) inserido na viga através da técnica EBR segundo as recomendações da norma CNR (2004).

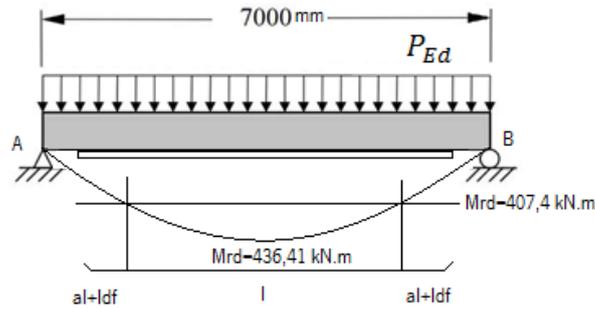


Figura 4.8 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP

$$P_{Ed} = 1,35 \cdot g_{k, f} + 1,5 \cdot q_{k, f} \quad [4.63]$$

$$\Leftrightarrow P_{Ed} = 1,35 \times 35 + 1,5 \times 16 = 71,25 \text{ kN.m} \quad [4.64]$$

$$\sum M_A = 0 \Leftrightarrow -71,25 \times \frac{7^2}{2} + 7 \times V_B \Leftrightarrow V_B = 249,4 \text{ kN} \quad [4.65]$$

A determinação do comprimento dos laminados ( $l$ ), é dada pela equação dos momentos apresentada pela expressão seguinte,

$$M_{(x)} = 249,4 \cdot x - \frac{71,25 \cdot x^2}{2} \quad [4.66]$$

Onde o valor máximo do momento solicitante é dado por,

$$M_{(3,5)} = 249,4 \cdot 3,5 - \frac{71,25 \cdot 3,5^2}{2} = M_{Ed} = 436,41 \text{ kN.m} \quad [4.67]$$

$$407,4 = 249,4 \times x - \frac{71,25 \times x^2}{2} \Leftrightarrow x \simeq 2,6 \text{ m} \wedge x = 4,40 \text{ m} \quad [4.68]$$

Então,

$$l = 7 - (2 \times 2,6) = 1,8 \text{ m} \quad [4.69]$$

Após a realização dos cálculos e análise dos mesmos conclui-se que é necessário reforçar a viga com laminados de CFRP com 1,8 m de comprimento longitudinal. Contudo, a norma CNR (2004) recomenda que se calcule um comprimento de amarração, que posteriormente é somado ao valor do comprimento longitudinal anteriormente calculado.

De acordo o CNR (2004) o comprimento de amarração do laminado inserido através da técnica EBR é dado por,

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f \times t_f}{2 \times f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{E_f \times n_f \times t_{f.1}}{2 \times f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{165000 \times 1 \times 1,4}{2 \times 2,6}} = 210,77 \text{ mm} \quad [4.70]$$

$$a_1 = \frac{0,9 \cdot h \cdot (1 - \cot \alpha)}{2} = \frac{0,9 \times 700 \times (1 - \cot 90^\circ)}{2} = 315 \text{ mm} \quad [4.71]$$

Sendo assim, comprimento total utilizado na direção longitudinal na viga segundo a técnica EBR é dado por,

$$l_{EBR} = 1,8 + 2 \times 210,77 \times 10^{-3} + 2 \times 315 \times 10^{-3} = 2,85 \approx 2,90 \text{ m} \quad [4.72]$$

#### 4.5 Reforço à flexão com recurso à técnica NSM

O dimensionamento do reforço à flexão com a técnica NSM segue a mesma metodologia de cálculo que a técnica EBR. De acordo com o procedimento guiado pela norma ACI 440.2R, o dimensionamento de um reforço reger-se-á segundo um processo de tentativa-erro. Como já foi explícito para os cálculos de reforço segundo a técnica EBR, a determinação do eixo neutro ( $c$ ) é um processo iterativo, onde inicialmente se arbitra um valor para o eixo neutro e que posteriormente, este é comparado com um valor calculado. Se estes dois valores forem coincidentes, a posição do eixo neutro foi encontrada, senão deve-se arbitrar novos valores para  $c$  até haver igualdade entre os dois.

De seguida apresenta-se a metodologia de cálculo do dimensionamento do reforço à flexão, segundo a técnica NSM de acordo com ACI 2008.

A deformação do FRP, em estado limite último, é obtida através da fórmula seguinte,

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq K_m \cdot \varepsilon_{fu} \quad [4.73]$$

em que,

$K_m$  – Coeficiente de redução da deformação máxima do FRP.

O ACI (2002) recomenda a limitação da deformação existente no FRP ( $\varepsilon_{fe}$ ), através da aplicação do fator de redução  $K_m$  à deformação última do FRP ( $\varepsilon_{fu}$ ). Este fator tem como objetivo, impedir a ruína do

reforço por destacamento ou descolamento. O parâmetro  $K_m = 0,7$ , segundo as recomendações do ACI.

A determinação da tensão instalada no FRP é obtida através da fórmula seguinte,

$$f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe} = \quad se \quad \varepsilon_f < K_m \times \varepsilon_{fu} \quad [4.74]$$

$$f_{fe} = 0 \quad se \quad \varepsilon_f \geq K_m \times \varepsilon_{fu} \quad [4.75]$$

A determinação da tensão instalada no aço é obtida através da fórmula seguinte,

$$f_s = E_s \times \varepsilon_s \quad se \quad \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \quad [4.76]$$

$$f_s = f_{sy} \quad se \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy} \quad [4.77]$$

O valor de cálculo da posição do eixo neutro é obtido através da fórmula seguinte,

$$c = \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe}}{\alpha_1 \times f_c \times \beta_1 \times b} \quad [4.78]$$

Depois de se chegar a convergência entre os dois valores de  $c$ , é possível determinar a resistência à flexão da seção com o elemento de reforço de CFRP através da fórmula seguinte,

$$M_n = A_s \times f_s \times \left( d - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) + \Psi_f \times A_f \times f_{fe} \times \left( h - \frac{\beta_1 \times c}{2} \right) \quad [4.79]$$

De acordo com este procedimento foram efetuados os cálculos para o dimensionamento do reforço à flexão em estados limite últimos da viga tipo em análise. A viga tipo em estudo é apresentada na Figura 4.9.

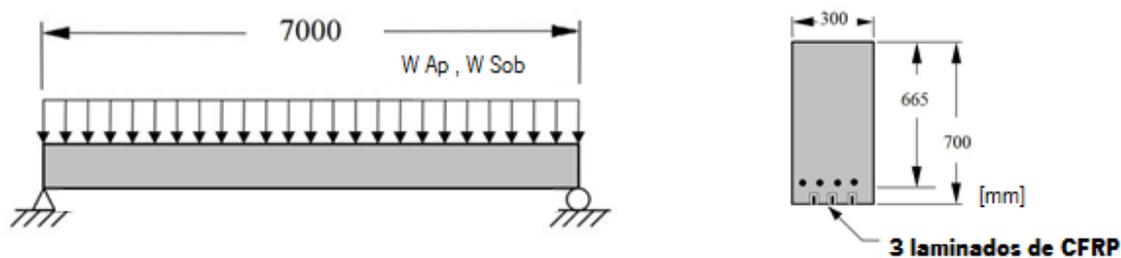


Figura 4.9 - Geometria da viga tipo em estudo (adaptado de Cruz et al., 2011)

Na Tabela 4.9 apresentam-se as características gerais da viga tipo estudada e na Tabela 4.10 apresentam-se as ações que a viga vai estar sujeita e os seus respectivos momentos solicitantes.

Tabela 4.9 - Principais características da viga em estudo

Comprimento da viga (l)	7000 m
Largura da viga (b)	300 mm
$d_s$	665 mm
$h/d_f$	700 mm
$f'_c$	25 MPa
$f_{yd}$	347,83 MPa
$M_{rd}$ (momento resistente da viga não reforçada)	407,435 kN.m
Área de armadura em tração ( $A_{s1}$ )	4Ø25 (1963 mm <sup>2</sup> )

Tabela 4.10 - Ações a que está sujeita a viga tipo e os seus momentos correspondentes (adaptado de ACI, 2008)

<b>Ação/momento</b>	<b>Iniciais</b>	<b>Finais</b>
$W_{AP}$ (ações permanentes)	35 kN/m	35 kN/m
$W_{SOB}$ (sobrecarga)	10 kN/m	16 kN/m
WAP+WSOB (cargas não majoradas)	45 kN/m	51 kN/m
Combinação 1 ( $1.1W_{AP}+0.75W_{sob}$ )	N/A	50,5 kN/m
Combinação 2 ( $1.2W_{AP}+1.6W_{sob}$ )	58 kN/m	67,6 kN/m
Momento devido ao peso próprio ( $M_{AP}$ )	214 kN.m	214,375 kN.m
Momento devido à sobrecarga ( $M_{sob}$ )	61 kN.m	98 kN.m
Momento para a carga de serviço ( $W_s$ )	276 kN.m	312 kN.m
Momento da combinação 1 ( $1.1M_{AP}+0.75M_{sob}$ )	N/A	309,3125 kN.m
Momento da combinação 2 ( $M_U$ ) ( $1.2M_{AP}+1.6M_{sob}$ )	355 kN.m	414,05 kN.m

Optou-se por reforçar a viga com um laminado de CFRP presente nas tabelas disponibilizadas pela empresa S&P, com dimensões apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Características fundamentais do laminado de CFRP (adaptado de ACI, 2008)

$t_f$ (espessura do CFRP)	1,4 mm
$b_f$ (largura do CFRP)	20 mm
$d_f$ (altura útil do CFRP)	700 mm
$f_{fu}^*$ (resistência última à tração do laminado)	2000 MPa
$\varepsilon_{fu}^*$ (extensão de rotura)	0,01212
$E_f$ (módulo de elasticidade)	165 GPa

Na Tabela 4.12 são expostos os procedimentos de cálculo para o dimensionamento de reforço à flexão de acordo com a norma ACI (2008) recorrendo a técnica NSM com a aplicação do laminado de CFRP com as propriedades anteriormente referidas.

Tabela 4.12 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica NSM (adaptado de ACI, 2008)

Procedimentos	Operações
<p><b>1º passo: calcular as propriedades de cálculo do sistema de FRP</b></p> <p>A viga está localizada no interior de um edifício e será utilizado um laminado de CFRP. De acordo com a Tabela 4.3, <math>C_E=0,95</math>.</p> $f_{fu} = C_E \times f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \times \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = 0,95 \times 2000 = 1900 \text{ N/mm}^2$ $\varepsilon_{fu} = 0,95 \times 0,01212 = 0,0115 \text{ N/mm}^2$
<p><b>2º passo: cálculos preliminares</b></p> <p>Propriedades do betão:</p> $E_c = 31 \text{ GPa}$ <p>Propriedades do aço:</p> $\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$ <p>Propriedades do FRP:</p> $A_f = n \cdot t_f \cdot b_f$ $\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d_f}$	$A_s = 1963 \text{ mm}^2$ $\rho_s = \frac{1963}{300 \times 665} = 0,00984$ $A_f = 3 \times 1,4 \times 20 = 84 \text{ mm}^2$ $\rho_f = \frac{84}{300 \times 700} = 0,0004$

Tabela 4.12 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica NSM (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>3º passo: calcular as propriedades de cálculo do sistema de FRP</b></p> <p>O estado de extensão existente no substrato é calculado assumindo que a viga está em fase fendilhada, e que, no momento da aplicação do reforço, apenas atuam as ações permanentes. Da análise da secção fendilhada obtém-se <math>k = 0,2985</math> e <math>I_{cr} = 3538 \times 10^6</math>.</p> $\varepsilon_{bi} = \frac{M_{AP}(d_f - kd_s)}{I_{cr}E_c}$	$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c}\right)}$ $k = \sqrt{\left(0,00984 \frac{200}{31}\right)^2 + 2\left(0,00984 \frac{200}{31}\right) - \left(0,00984 \frac{200}{31}\right)}$ $= 0,2985$ $I_{cr} = \frac{b \cdot d_s^3}{3} \cdot k^3 + \frac{E_s}{E_c} A_s \cdot d_s^2 (1 - k)^2 = 3538 \times 10^6$ $\varepsilon_{bi} = \frac{214000 \times (700 - 0,2985 \times 665)}{3538 \times 10^3 \times 31} = 0,00098$
<p><b>4º passo: determinar o coeficiente Km</b></p> <p>Km=0,7</p>	<p>Km=0,7</p>
<p><b>5º passo: determinar a extensão máxima do FRP</b></p> <p>Considerar <math>c = 0.20d</math> é uma estimativa inicial razoável.</p>	$c = 0.20 \times 665 = 133 \text{ mm}$
<p><b>6º passo: determinar a extensão efetiva no FRP</b></p> <p>A extensão efetiva é calculada através da equação 4.73,</p> $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \times \left(\frac{h - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fu} \cdot k_m$ <p>É de salientar que, para a posição de eixo neutro selecionada, o modo de rotura é por cedência do FRP, dado que é a parcela da direita que controla. Caso contrário, o modo de rotura seria por esmagamento do betão.</p> <p>Dado que o FRP controla a rotura da secção, a extensão no betão em rotura deverá ser inferior a 0.003 e pode ser calculada por intermédio da seguinte equação,</p> $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left(\frac{c}{d_f - c}\right)$	$\varepsilon_{fe} = 0,003 \times \left(\frac{700 - 133}{133}\right) - 0,00098 \leq 0,0115 \times 0,7$ $\varepsilon_{fe} = 0,0118 \leq 0,00806 \text{ não verifica}$ <p>então <math>\varepsilon_{fe} = 0,00806</math></p> <p>(Modo de rotura do FRP dá-se por descolagem)</p> $\varepsilon_c = (0,00806 + 0,00098) \times \left(\frac{133}{700 - 133}\right) = 0,0021$

Tabela 4.12 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica NSM (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>7º passo: calcular a extensão nas armaduras existentes</b></p> <p>A extensão na armadura é dada por a equação 4.23,</p> $\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \times \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right)$	$\varepsilon_s = (0,00806 + 0,00098) \times \left( \frac{665 - 133}{700 - 133} \right) = 0,0085$
<p><b>8º passo: calcular a tensão nas armaduras existentes e no FRP</b></p> $f_s = E_s \times \varepsilon_s \leq f_{yd}$ $f_{fe} = E_f \times \varepsilon_{fe}$	$f_s = 200000 \times 0,0085 = 1696,23 \text{ N/mm}^2$ $f_s = 1696,23 > 347,83 \text{ não verifica}$ <p>então <math>f_s = 347,83 \text{ N/mm}^2</math></p> $f_{fe} = 165000 \times 0,00806 = 1330 \text{ N/mm}^2$
<p><b>9º passo: calculo das forças internas e verificação do equilíbrio</b></p> <p>Os parâmetros <math>\beta_1</math> e <math>\alpha_1</math> podem ser calculados de forma mais refinada segundo as recomendações do ACI 318-05:</p> $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c}$ $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 (\varepsilon'_c)^2}$ <p>em que,</p> $\varepsilon'_c = \frac{1,7f'_c}{E_c}$ <p>A verificação do equilíbrio é efetuada calculando <math>c</math> segundo a equação 4.78 e comparando o valor obtido com o estimado no passo nº5.</p> $c = \frac{A_s \times f_s + A_f \times f_{fe}}{\alpha_1 \times f'_c \times \beta_1 \times b}$	$\varepsilon'_c = \frac{1,7 \times 25}{31} = 0,0014$ $\beta_1 = \frac{4 \times 0,0014 - 0,0012}{6 \times 0,0014 - 2 \times 0,0012} = 0,84$ $\alpha_1 = \frac{3 \times 0,0014 \times 0,0012 - 0,0012^2}{2 \times 0,74(0,0014)^2} = 0,88$ $c = \frac{1963 \times 347,83 + 84 \times 1330}{0,84 \times 25 \times 0,88 \times 300} = 141,4 \text{ mm}$ $c = 141,4 \text{ mm} \neq 133 \text{ mm}$ <p>∴ Não se obteve convergência, visto isto, prosseguir com o 10º passo.</p>

Tabela 4.12 - Procedimentos de cálculo para a verificação do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica NSM (continuação)

Procedimentos	Operações
<p><b>10º passo: ajustar o valor de c até ser garantido o equilíbrio</b></p> <p>Os passos 6 a 9 são repetidos o número de vezes necessário com diferentes valores de <math>c</math> até se encontrar o equilíbrio. Os resultados da última iteração resumem-se de seguida:</p> $c = 141 \text{ mm}$ $\varepsilon_s = 0.005$ $f_s = f_{yd} = 347.83 \text{ MPa}$ $f_{fe} = 1330 \text{ MPa}$ $\beta_1 = 0.86$ $\alpha_1 = 0.87$	$c = \frac{1963 \times 347.83 + 84 \times 1330}{0.86 \times 25 \times 0.87 \times 300} \approx 141 \text{ mm}$ <p>∴ Verifica-se convergência o valor adotado para <math>c</math> está correto.</p>
<p><b>11º passo: cálculo do momento resistente</b></p> <p>O valor de cálculo do momento resistente determina-se segundo a equação 4.79. Um fator adicional de segurança, <math>\Psi_f = 0.85</math>, aplica-se à parcela relativa à contribuição do FRP. Como, <math>\varepsilon_s = 0.0085 \geq 0.005</math> deve-se aplicar um fator de redução da resistência, <math>\phi = 0.90</math>, na equação 4.79 que se segue,</p> $M_n = \phi \cdot \left[ A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \Psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right]$	$M_n = 0.90 \times \left[ 1963 \times 347.83 \times \left( 665 - \frac{0.86 \times 141}{2} \right) + 0.85 \times 84 \times 1330 \times \left( 700 - \frac{0.86 \times 141}{2} \right) \right]$ $M_n = 426.04 \text{ kN.m} > M_u = 414 \text{ kN.m}$ <p>∴ O momento resistente é superior ao momento máximo para a configuração de carregamento da estrutura reforçada.</p>

O reforço da viga não será efetuado ao longo de todo o seu comprimento longitudinal, pois não constitui uma solução económica. Sendo assim, os laminados de CFRP serão apenas aplicados nas secções onde a capacidade resistente inicial da viga é ultrapassada. Além dessas secções é necessário considerar também o comprimento de amarração dos laminados.

De seguida, apresentam-se os cálculos efetuados para a obtenção do comprimento total do laminado de CFRP (Figura 4.10) inserido na viga através da técnica EBR segundo as recomendações da norma CNR (2004).

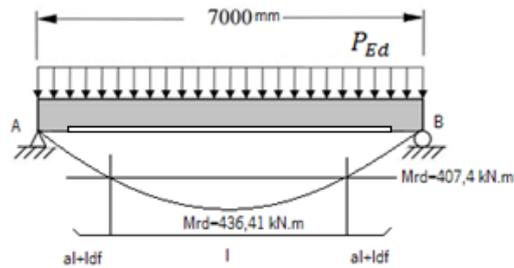


Figura 4.10 - Comprimento de amarração do laminado de CFRP

$$P_{Ed} = 1,2 \cdot g_k \cdot f + 1,6 \cdot q_k \cdot f \quad [4.80]$$

$$\Leftrightarrow P_{Ed} = 1,2 \times 35 + 1,6 \times 16 = 67,6 \text{ kN.m} \quad [4.81]$$

$$\sum M_A = 0 \Leftrightarrow -67,6 \times \frac{7^2}{2} + 7 \times V_B \Leftrightarrow V_B = 236,6 \text{ kN} \quad [4.82]$$

A determinação do comprimento dos laminados ( $l$ ), é dada pela equação dos momentos apresentada pela expressão seguinte,

$$M_{(x)} = 236,6 \cdot x - \frac{67,6 \cdot x^2}{2} \quad [4.83]$$

Onde o valor máximo do momento solicitante é dado por,

$$M_{(3,5)} = 236,6 \cdot 3,5 - \frac{67,6 \cdot 3,5^2}{2} = M_{Ed} = 414,05 \text{ kN.m} \quad [4.84]$$

$$407,4 = 236,6 \times x - \frac{67,6 \times x^2}{2} \Leftrightarrow x \simeq 3,05 \text{ m} \wedge x = 3,94 \text{ m} \quad [4.85]$$

Então,

$$l = 7 - (2 \times 3,05) = 0,9 \text{ m} \quad [4.86]$$

Após a realização dos cálculos e análise dos mesmos conclui-se que é necessário reforçar a viga com laminados de CFRP com 1,8 m de comprimento longitudinal. Contudo, a norma ACI (2008) recomenda que se calcule um comprimento de amarração, que posteriormente é somado ao valor do comprimento longitudinal anteriormente calculado. A Figura 4.11 ilustra as dimensões mínimas que as ranhuras efetuadas para colocar os laminados de CFRP devem ter.

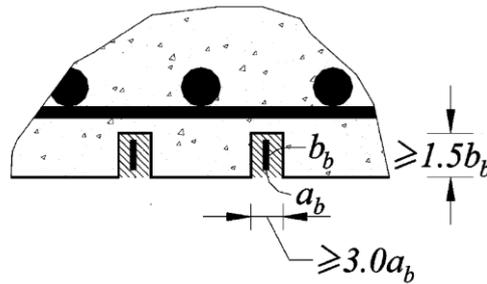


Figura 4.11 - Dimensão mínima das ranhuras (adaptado de ACI, 2008)

De acordo o ACI (2008) o comprimento de amarração do laminado inserido através da técnica NSM é dado por,

$$l_{ab} = \frac{a_b \cdot b_b}{2 \cdot (a_b + b_b) \cdot \tau_b} - f_{fd} \cdot CE = \frac{1,4 \times 20}{2 \times (1,4 + 20) \times 6,9} - 2000 \times 0,95 \quad [4.87]$$

$$\Leftrightarrow l_{ab} = 180,14 \text{ mm} \quad [4.88]$$

em que,

$a_b$  - Espessura do laminado;

$b_b$  - Largura do laminado;

$\tau_b$  - Tensão tangencial (ACI (2008) recomenda o valor de 6,9 MPa);

CE - Fator de redução ambiental (Tabela 4.3)

$f_{fd}$  - Tensão instalada no FRP.

$$a_l = \frac{0,9 \cdot h \cdot (\cot \theta - \cot \alpha)}{2} = \frac{0,9 \times 700 \times (\cot 45^\circ - \cot 90^\circ)}{2} = 315 \text{ mm} \quad [4.89]$$

Sendo assim, comprimento total utilizado na direção longitudinal na viga segundo a técnica NSM é dado por,

$$l_{NSM} = 0,9 + 2 \times 180,14 \times 10^{-3} + 2 \times 315 \times 10^{-3} = 1,89 \approx 1,90 \text{ m} \quad [4.90]$$

## 4.6 Análise comparativa

O reforço de vigas à flexão por encamisamento de betão armado, dado à sua simplicidade de execução, permite obter uma solução eficiente sem necessitar de mão-de-obra especializada, o que resulta numa diminuição de custos associada à mão-de-obra. No entanto, este tipo de técnicas de reforço gera

elementos finais com seções superiores as inicialmente existentes o que afeta o poder estético do elemento reforçado e, devido ao tempo de cura do betão, é um processo muito moroso.

Segundo Dias e Barros (2011), o êxito de uma determinada técnica de reforço está diretamente relacionada com as propriedades dos materiais que utiliza, com a exequibilidade económica e com as questões estéticas dos elementos estruturais a reforçar, onde devem ser estudados e posteriormente correlacionados diferentes parâmetros, tais como, o custo dos materiais, o tempo e a facilidade do processo de execução do reforço, a redução dos efeitos no funcionamento normal da estrutura na altura da aplicação do reforço e os preços associados aos processos de manutenção após a estrutura reforçada entrar em serviço. Neste âmbito, é globalmente aceite que as técnicas de reforço com compósitos de CFRP conduzem a soluções tanto ou mais eficientes que as técnicas de reforço tradicionais.

Os estudos já efetuados sobre a utilização de laminados de CFRP no reforço à flexão de vigas de betão armado, aplicados segundo a técnica EBR ou NSM, comprovam que se consegue obter um incremento significativo na capacidade resistente da viga quando sujeita à flexão. No entanto, principalmente na aplicação da técnica EBR, devido aos modos de rotura prematuros, em especial ligados à ligação de betão-adesivo-CFRP, tem-se comprovado que é difícil conseguir o aproveitamento total do sistema de reforço. Este inconveniente ocorre especialmente devido ao facto do sistema de reforço com CFRP segundo a técnica EBR apresentar uma menor área de colagem.

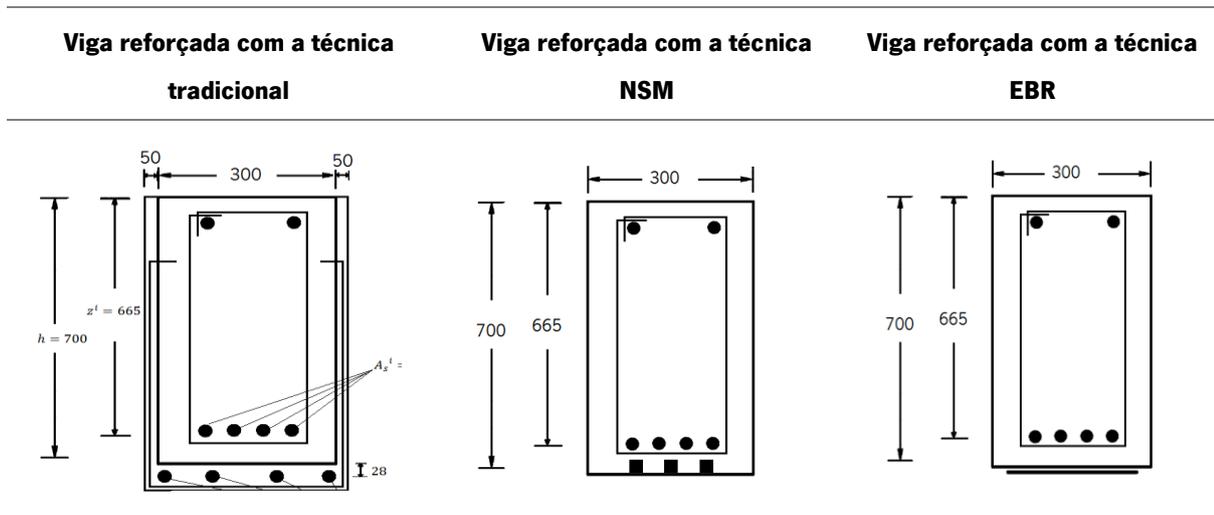
No caso da aplicação da técnica NSM, consegue-se ter um maior aproveitamento do sistema, visto que esta garante uma maior área de colagem, permitindo assim, uma maior fixação do sistema de reforço com CFRP ao betão. O facto de o laminado de CFRP segundo a técnica NSM estar mais fixado ao elemento estrutural a reforçar, traz diversas vantagens sobre a técnica EBR, dos quais se destacam, a redução e a retardação dos possíveis modos de rotura existentes nos sistemas de reforço à flexão. Outro ponto benéfico da técnica NSM, é o facto de os laminados serem inseridos e colados em ranhuras efetuadas nas zonas de recobrimento do betão, o que faz com que estes fiquem menos expostos face às diversas condições ambientais e até mesmo atos de vandalismo.

Na Tabela 4.13 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para as diferentes técnicas de reforço analisadas. Através da informação descrita ao longo da dissertação e dos dados apresentados na tabela seguinte, é exequível assumir que a técnica NSM, devido às grandes vantagens que apresenta em relação à técnica tradicional e à técnica EBR, é a técnica mais eficiente e esteticamente mais aconselhada para reforçar a viga tipo estudada.

Tabela 4.13 - Principais características das técnicas usadas para o reforço da viga tipo em estudo

Viga reforçada com a técnica tradicional	Viga reforçada com a técnica NSM	Viga reforçada com a técnica EBR
Características do reforço		
Aço A400 NR $A_s^r = 4\text{Ø}16 \text{ (}804,3 \text{ mm}^2\text{)}$ $f_{syd}^r = 347,83 \text{ MPa}$ Rec. inf=3,5cm Betão C25/30	3 laminados de CFRP $E_f = 165 \text{ GPa}$ $f_{fu}^* = 2000 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{fu}^* = 0,01212$	1 laminado de CFRP $E_f = 165 \text{ GPa}$ $f_{fu}^* = 2000 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{fu}^* = 0,01212$
Área de reforço		
Área (Betão + Armadura): $98400 \text{ mm}^2$ $l = 7,80 \text{ m}$ (comprimento do reforço na direção longitudinal da viga)	3 laminados de CFRP: $82 \text{ mm}^2$ $l_{NSM} = 1,90 \text{ m}$ (comprimento do reforço na direção longitudinal da viga)	1 laminado de CFRP: $210 \text{ mm}^2$ $l_{EBR} = 2,0 \text{ m}$ (comprimento do reforço na direção longitudinal da viga)
Volume de reforço		
Volume (betão + armadura): $= 6,88 \times 10^8 \text{ mm}^3$	3 laminados de CFRP: $229600 \text{ mm}^3$	1 laminado de CFRP: $609000 \text{ mm}^3$
Peso próprio do reforço		
$\rho_{\text{betão armado}} = 25 \text{ kN/m}^3$ $Pp, \text{ reforço} = 25 \times (98400 \times 10^{-6})$ $= 2,46 \text{ kN/m}$	$\rho_{\text{fibra de carbono}} = 19 \text{ kN/m}^3$ $Pp, \text{ reforço} = 19 \times 82 \times 10^{-6}$ $= 0,0016 \text{ kN/m}$	$\rho_{\text{fibra de carbono}} = 19 \text{ kN/m}^3$ $Pp, \text{ reforço} = 19 \times 210 \times 10^{-6}$ $= 0,004 \text{ kN/m}$

Tabela 4.13 - Principais características das técnicas usadas para o reforço da viga tipo em estudo  
(continuação)



Momentos relacionados a cada técnica de reforço estudada

Appleton e Gomes (1997)

$$M_{Rd,sem\ reforço} = 407,4\text{ kN.m}$$

$$M_{Ed} = 436,4\text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,com\ reforço} = 479,5\text{ kN.m}$$

Norma ACI (2008)

$$M_{Rd,sem\ reforço} = 407,4\text{ kN.m}$$

$$M_u = 414,05\text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,com\ reforço} = 426,04\text{ kN.m}$$

Norma ACI (2008)

$$M_{Rd,sem\ reforço} = 407,4\text{ kN.m}$$

$$M_u = 414,05\text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,com\ reforço} = 443,81\text{ kN.m}$$

Norma CNR (2004)

$$M_{Rd,sem\ reforço} = 407,4\text{ kN.m}$$

$$M_{Ed} = 436,4\text{ kN.m}$$

$$M_{Rd,com\ reforço} = 476,5\text{ kN.m}$$

## **Capítulo 5**

### **CASOS DE ESTUDO**

#### **5.1 Introdução**

Uma vez que não foi possível elaborar a comparação do estudo de ACV entre as técnicas de reforço EBR e NSM com recurso a laminados de CFRP, devido à falta de dados referentes aos mesmos, quer via internet quer via empresarial. Neste capítulo serão apresentados dois casos de estudo realizados por diversos autores, com o propósito de aumentar o conhecimento da ferramenta ACV quando aplicada em problemas de engenharia civil, neste caso específico, em situações de reforço estrutural e construções de tanques marítimos.

#### **5.2 Caso de estudo I - Análise do ciclo de vida de técnicas de reforço de vigas de betão armado**

##### **5.2.1 Descrição geral**

O presente caso de estudo foi realizado por Hongyu Zhou em Maio de 2013 (Zhou,2013) e consiste na realização de uma ACV comparando duas técnicas de reforço:

- i. Encamisamento com adição de chapas metálicas;
- ii. Aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).

O autor definiu como fronteiras para o sistema, o processo desde a fase de aquisição de matérias-primas até a sua disposição final (“berço-túmulo”). Os fatores energéticos e ambientais envolvidos no processo de fabrico, no transporte, e local de aplicação são avaliados e monitorizados.

O material usado para o reforço com CFRP foi baseado num estudo efetuado por Zhou e Attard (2013), e os resultados são extrapolados para uma ponte rodoviária típica nos Estados Unidos da América de duas vias, como apresentado na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Ponte rodoviária típica dos U.S.A (reproduzido de Zhou, 2013)

As duas estratégias de reforço baseiam-se na mesma unidade funcional, que é identificada na seção 5.2.3. O consumo de energia e os possíveis impactos ambientais, tais como as emissões dos gases de efeito estufa (GEE), foram comparados a fim de ajudar os donos da obra a tomar decisões sobre qual o sistema de reforço mais rentável e com menor impacto no meio ambiente.

### **5.2.2 Fronteiras do sistema, fluxo elementar e recolha de dados**

As fronteiras do sistema abrangem a análise do “berço-túmulo” para as duas técnicas de reforço estudadas, isto é, as avaliações efetuadas começam desde a extração das matérias-primas até a fase de utilização. Neste contexto, os processos considerados neste caso de estudo incluem a extração de matérias-primas (por exemplo: minério de ferro para a técnica de reforço com adição de chapas metálicas e produtos de petróleo, tais como a amônia, para as fibras de carbono e os polímeros associados), a produção do aço e das fibras de carbono, o transporte e a aplicação “in situ” de ambos os sistemas de reforço. De seguida apresenta-se um fluxograma (Figura 5.2), que inclui os processos fundamentais do presente caso de estudo, salienta-se que, os processos inseridos dentro das caixas a tracejado não foram incluídos nesta análise.

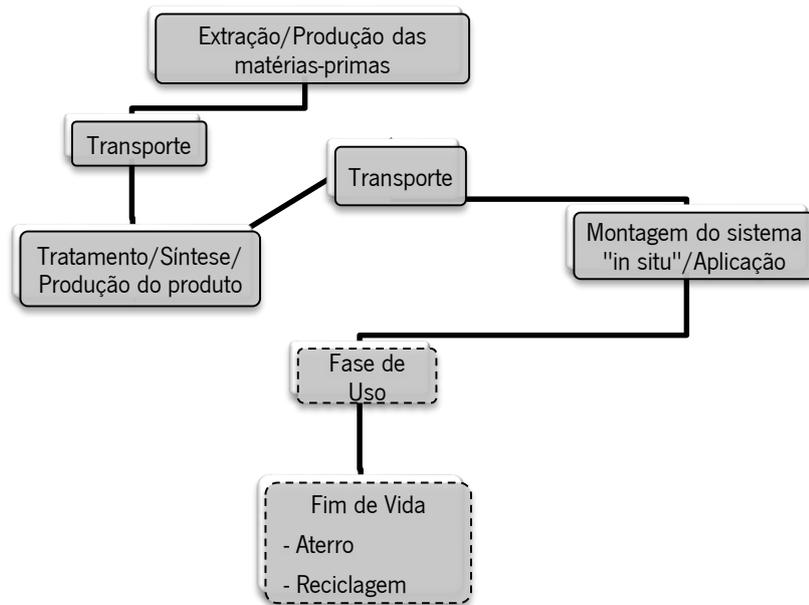


Figura 5.2 - Fluxograma da ACV dos sistemas de reforço (adaptado de Zhou, 2013)

### 5.2.2.1 Reforço com encamisamento de chapas metálicas

O reforço com encamisamento de chapas metálicas consiste em colocar na parte inferior do elemento estrutural a reforçar uma chapa de aço com o objetivo de aumentar a sua capacidade de carga aos esforços de flexão. A colagem deste elemento de reforço pode ser efetuada com resinas epóxi ou com ancoragens mecânicas. A Figura 5.33 ilustra o ciclo de vida desta técnica de reforço tradicional. O transporte para ambos os materiais e para os produtos finais foram incluídos neste estudo, no entanto, devido à falta de informação, o material armazenado no local do contratante foi excluído deste estudo.

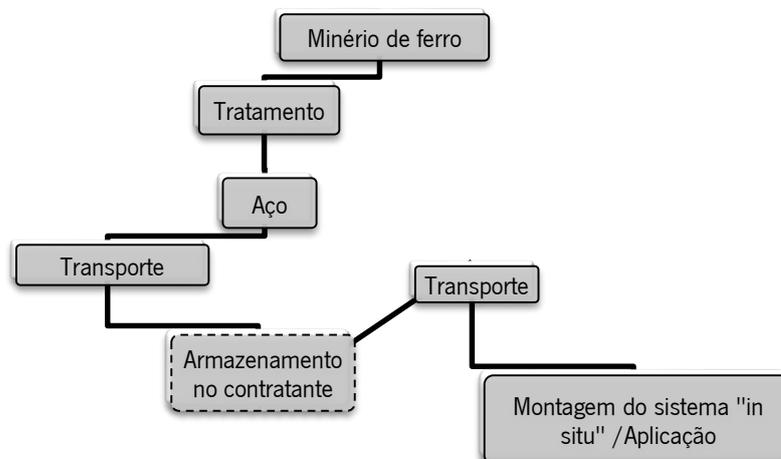


Figura 5.3 - Fluxograma da ACV do sistema de reforço com adição de chapas metálicas (adaptado de Zhou, 2013)

### 5.2.2.2 Reforço com CFRP

As fibras de carbono são produzidas a partir de precursores de fibras, tais como poliácridonitrila (PAN). A PAN é um produto de polimerização de acrilonitrilo, e o acrilonitrilo é produzido pelo processo da Sohio. Para sintetizar 1 kg de acrilonitrilo, são necessários 0,4 kg de amoníaco e 1 kg de propileno. (Zhou e Attard, 2013) Apesar de diversos estudos e pesquisas realizadas com o objetivo de obter informações relativamente aos recursos naturais e os seus respetivos consumos de energia, emissões e impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos CFRP, a informação que há acerca deste conteúdo é muito escassa. Com base num estudo efetuado na Universidade de Tóquio por Zhang et al., o consumo total de energia associada na produção de 1kg de fibras de carbono é 286 MJ. Outro elemento que se deve ter em conta neste caso de estudo é a matriz do compósito, que é normalmente formada por polímeros plásticos, tais como o poliéster, epóxi e o poliuretano. A resina epóxi, que é a matriz usada neste estudo, é produzida pela empresa BASF. Segundo os dados fornecidos pelo fabricante, 3.79 L de resina epóxi pode cobrir cerca de 5.11 m<sup>2</sup> de fibra de carbono. O processo de fabrico das resinas epóxi inclui a síntese dos seus dois constituintes, a epiclorigidrina e o bisfenol-A, como se ilustra na Figura 5.4.

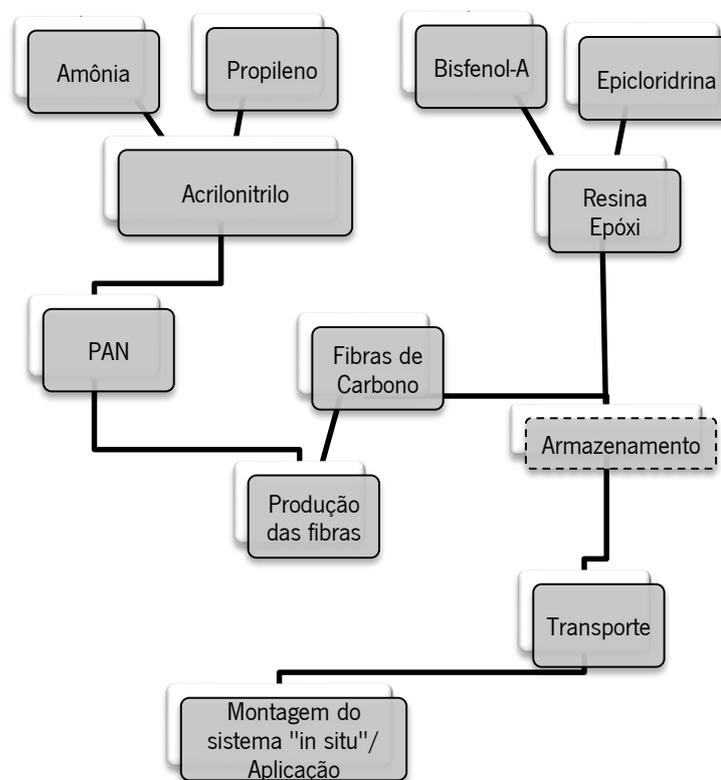


Figura 5.4 - Fluxograma da ACV do sistema de reforço com CFRP (adaptado de Zhou, 2013)

### 5.2.2.3 Transportes

Como a maioria das fibras de carbono disponíveis no mercado de construção são fabricadas maioritariamente no Japão, o transporte marítimo foi abrangido neste estudo. A maioria dos componentes dos sistemas de reforço com CFRP usados na indústria da construção civil dos Estados Unidos da América (EUA) são importados de fábricas Japonesas, tais como a TORAY. Os componentes das resinas epóxi são tipicamente fabricados nos EUA. Os dados relativos à fase de transporte neste estudo foram retirados da base de dados Ecoinvent. Por exemplo, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) proveniente da viagem de um navio é cerca de 0,00925 kg CO<sub>2</sub>-eq por (ton/km) e o consumo de energia associado a essa viagem é cerca de 0,34 MJ por (ton/km). Depois do navio chegar ao porto a carga, normalmente em forma de rolos em tecido, é transferida para camiões ligeiros que por sua vez, a transportam para o local das obras a serem aplicados. As emissões e o consumo de energia provocados por este meio de transporte vão ser muito menores do que o transporte marítimo, e os dados para a operação de deslocação dos camiões ligeiros foram retirados de um relatório divulgado pela Rede de Tecnologias Energéticas (ETN) em 2011.

### 5.2.3 Unidade funcional

O objetivo da maioria dos sistemas de reforço estrutural é repor ou aumentar a capacidade de carga de um elemento estrutural, ou em alguns casos, prolongar o tempo de vida útil (por exemplo à fadiga) ou aumentar a sua durabilidade relativamente aos fatores ambientais. Este caso de estudo está focado em aumentar a capacidade de carga estática de uma viga de uma ponte.

O projeto de reforço com CFRP de uma viga de betão armado foi realizado por Zhou e Attard, (2013) sendo o sistema de reforço adotado ilustrado na Figura 5.5. A capacidade de carga de flexão para cada sistema de reforço de CFRP na viga é de 142 kN×m. Cerca de 28,5 kg (95 m<sup>2</sup> e 0,165 mm de espessura) de tecido de fibra de carbono e 18,3 kg (18,6 L) de resina epóxi saturada são usados como material de reforço para a ponte típica de duas vias. A fim de alcançar a mesma capacidade de carga são usadas cerca de 1031 kg de chapas de aço com 4,2 milímetros de espessura (413 MPa) para o reforço da ponte segundo a técnica tradicional de encamisamento. A fim de gerar resultados projetáveis, a unidade funcional deste estudo é selecionada para cada 8 m de vão.

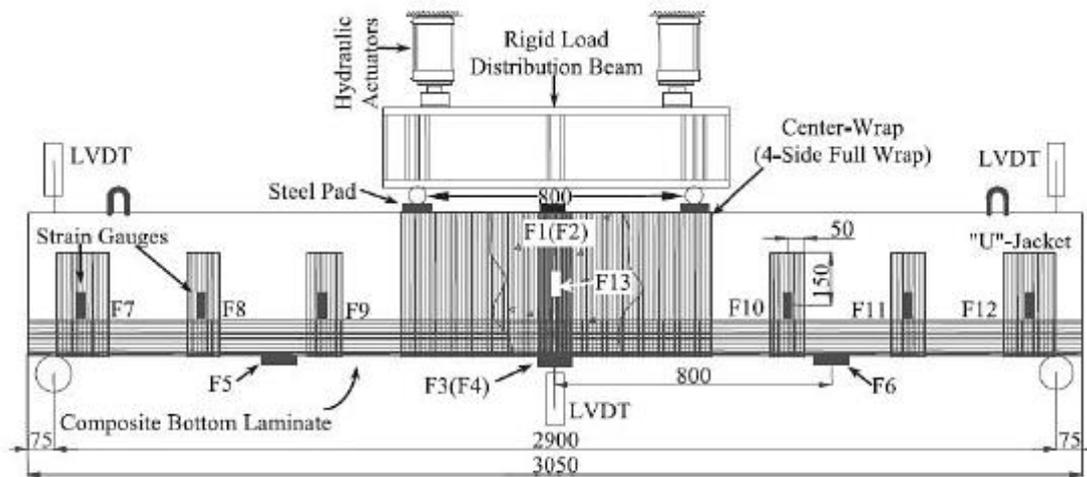


Figura 5.5 - Sistema de reforço com CFRP (reproduzido de Zhou, 2013)

#### 5.2.4 Avaliação do impacto do ciclo de vida

Nesta fase, os dados são interpretados em termos dos seus respetivos impactos ambientais, tais como, mudanças climáticas (aquecimento global), acidificação, eutrofização, etc. Na primeira fase desta avaliação (classificação) os dados do inventário são selecionados e atribuídos a categorias de impacto específicas. Na segunda fase desta avaliação (caraterização) os dados do inventário são multiplicados por fatores de equivalência para cada categoria de impacto, como por exemplo, todos os gases do efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_3$ ) são agregados dentro da sua classe de impacto, que neste caso é o aquecimento global, e as suas emissões são convertidas em  $\text{CO}_2\text{-eq}$ , isto é, se tivermos 1 kg de  $\text{N}_2\text{O}$  é equivalente à emissão de 296 kg de  $\text{CO}_2$  e 1 kg de  $\text{CH}_4$  corresponde a uma emissão de 23 kg de  $\text{CO}_2$ .

No presente caso de estudo, o autor utiliza diferentes categorias de impacto ambiental para comparar a técnica de reforço por encamisamento com adição de chapas com a técnica de reforço recorrendo ao uso de CFRP, como pode ser visto na Figura 5.6. Esta comparação aborda o estudo desde a fase de produção, transporte até a fase de aplicação. A fase de manutenção e a disposição final dos CFRP's não foram consideradas devido à informação pesquisada pelo autor.

Apesar, das emissões de GEE e o consumo de energia para uma unidade de massa (kg) de fibra carbono ser significativamente maior do que o aço, uma vez comparados, o sistema de reforço com CFRP é o que exhibe melhor desempenho ambiental, isto devido ao facto de este sistema consumir menos material necessário para obter a mesma capacidade de carga que o sistema tradicional, em termos de peso as fibras de carbono apresentam apenas cerca de 3.33% do peso total das chapas de aço usadas no reforço.

Na Figura 5.6 a técnica de reforço com maior contribuição para o respetivo efeito é indicada com uma barra de 100%. A interpretação deste valor pode ser difícil porque a comparação entre categorias de impacto é impossível.

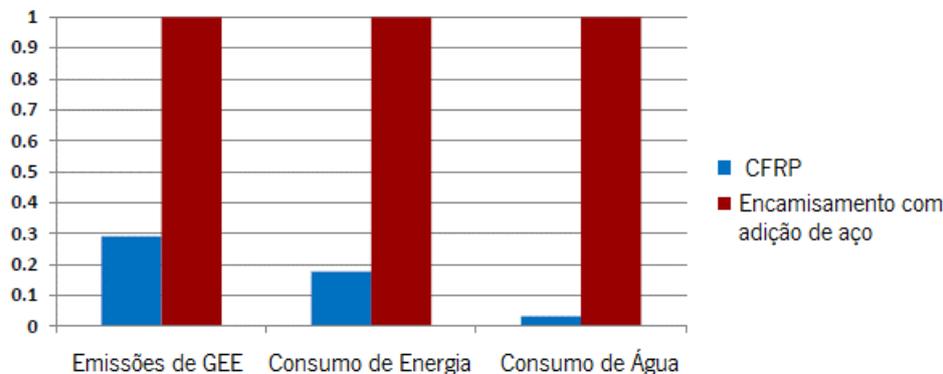


Figura 5.6 - Caracterização das duas técnicas de reforço aplicadas neste estudo (adaptado de Zhou, 2013)

Uma vez que os dados utilizados neste estudo provêm de diversas fontes diferentes, o perfil de impacto não tem sido normalizado num único ambiente. O banco de dados da Ecoinvent fornece diferentes métodos para um ou dois indicadores ambientais considerados neste estudo. No entanto, nem todos os indicadores cobertos por este caso de estudo foram identificados, como por exemplo, o consumo de energia. Além disso, o fator de peso aplicado para normalizar cada categoria de impacto pode variar de país para país (ou mesmo de região para região).

Por exemplo, o uso de água pode ser um indicador significativo nas regiões desérticas como o Arizona, no entanto, nos casos das áreas com abundantes recursos hídricos pode ser diferente. Assim, os resultados são descritos em seus valores absolutos (por unidades selecionadas) para cada indicador. A contribuição quantificada (não normalizada) para cada categoria de impacto (de emissão de gases de estufa, consumo de energia e uso de água) de acordo com a unidade funcional é apresentada na Tabela 5.1. Como os dados não foram normalizados a cruzar categorias existentes, a comparação tem que ser feita dentro de cada categoria considerada.

Tabela 5.1 - Resultados das duas técnicas de reforço utilizadas neste estudo (adaptado de Zhou, 2013)

<b>Reforço com CFRP</b>					
	Produção de Fibras de Carbono	Produção de Resina Epóxi	Aplicação	Transporte	Total
Emissões de GEE (kg CO <sub>2</sub> -eq)	883,5	17,591	310,43	5,5464	1217,067
Consumo de Energia (MJ)	8151	31,842	900	1034,7	10117,542
Consumo de Água (m <sup>3</sup> )	68,903	8,229	0	1,033	78,166
<b>Reforço tradicional (encamisamento com adição de chapas metálicas)</b>					
	Produção de Aço		Aplicação	Transporte	Total
Emissões de GEE (kg CO <sub>2</sub> -eq)	1030,550		3104,3	49,488	4184,338
Consumo de Energia (MJ)	29280,4		9000	18867,3	57147,7
Consumo de Água (m <sup>3</sup> )	2366,649		0	8,8666	2375,515

A Figura 5.7 e a Figura 5.8 apresentam as contribuições relativas dos processos considerados no âmbito de cada uma das três categorias de impacto para o encamisamento com adição de chapas metálicas e o reforço com CFRP, respetivamente.

Para a técnica de encamisamento com adição de chapas metálicas o consumo de energia e de água são dominantes na fase de produção do material, já na fase de aplicação predominam as emissões de GEE e o transporte. Isto é principalmente devido ao facto do material de aço apresentar elevado peso, o que exige uma maior mão-de-obra durante a fase de instalação.

Os impactos no reforço com CFRP, por outro lado, são principalmente dominantes na fase de fabricação do material, devido ao facto destes materiais apresentarem baixo peso específico, o que requer menos mão-de-obra na fase de utilização.

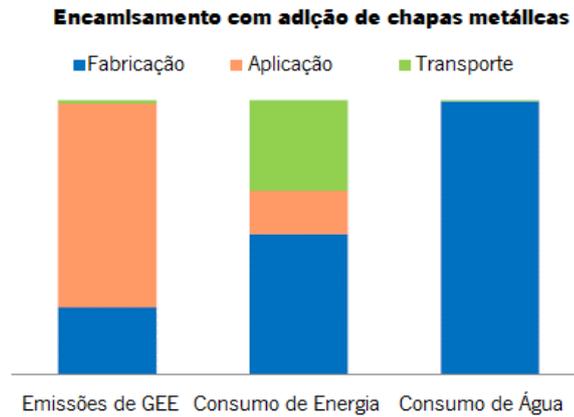


Figura 5.7 - Contribuição de cada fase para o impacto global da técnica de reforço tradicional (adaptado de Zhou, 2013)

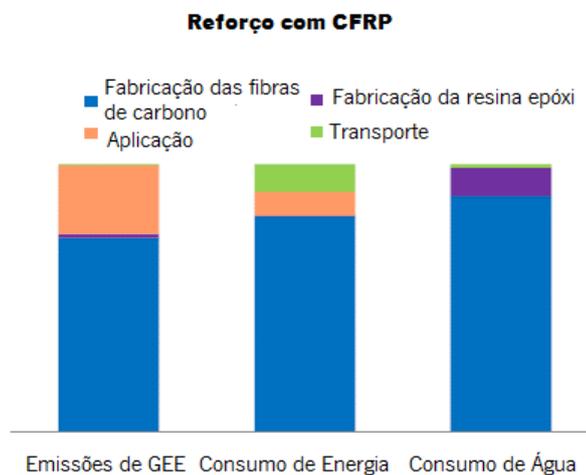


Figura 5.8 - Contribuição de cada fase para o impacto global da técnica de reforço com CFRP (adaptado de Zhou, 2013)

### 5.2.5 Qualidade dos dados

Neste tipo de análises são necessárias bases de dados de elevada qualidade para a obtenção de uma ACV com resultados precisos. Infelizmente, as bases de dados disponíveis para este estudo foram muito raras, especialmente no que se refere aos dados relativos à fase de fabricação das fibras de carbono. De seguida apresentam-se os fatores que podem influenciar a precisão dos resultados obtidos:

- a) A fonte de dados primária usada neste estudo é a Base de Dados Ecoinvent, onde a maioria dos estudos eram realizados na Europa. No entanto, este estudo abrange o mercado reforço

- estrutural nos Estados Unidos da América. Muitos fatores como por exemplo o consumo de energia podem variar bastante da Europa para os EUA;
- b) Quanto aos dados utilizados para a produção de fibras de carbono, foram utilizados dados baseados nas pesquisas efetuadas pelo autor do presente caso de estudo de acordo com Vegt (1997), Das (2011) e Umair (2006);
  - c) A solução de reforço com recurso ao encamisamento de chapas metálicas é tipicamente reciclável. No entanto, devido à falta de pesquisa da fase de fim de vida para os compósitos de fibra de carbono, a fase de disposição final para ambas as técnicas de reforço não está abordada neste caso de estudo.

## 5.2.6 Conclusão

Ao longo dos últimos anos as técnicas de reforço com uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) têm aumentado a sua popularidade no âmbito do sector da construção civil. Através deste caso de estudo encontrado na bibliografia, comparando a ACV de uma técnica de reforço tradicional com a ACV de uma técnica de reforço com recurso ao uso de CFRP, é possível avaliar qual destes dois processos gera menos impactos ambientais, e por conseguinte, analisar qual o mais ecológico.

Verificou-se que a técnica de reforço com CFRP mostrou superioridade sobre a técnica de reforço tradicional em todas as categorias de impacto abrangidas neste estudo. O principal fator desta superioridade deve-se ao facto que, na técnica de reforço com CFRP existe uma diminuição significativa no consumo de material na fase de produção, em comparação com a técnica de encamisamento com adição de chapas metálicas, para assegurar a mesma capacidade de carga no reforço da ponte em causa.

Mesmo que se o transporte marítimo fosse tido em conta neste caso de estudo, devido ao facto de as fibras de carbono serem muito mais leves que as chapas de aço, o consumo de energia e os impactos ambientais associados ao transporte das fibras de carbono iriam ser menores que os do aço.

## **5.3 Caso de estudo II - Análise do ciclo de vida relativo à comparação de dois sistemas de tanques para aquários (FRP vs. betão)**

### **5.3.1 Descrição geral**

O presente caso de estudo foi realizado por Evrydiki Fekka, Forest Flager, Nick Frieden, Tom Mercer, Sarah Russel-Smith (Fekka et al., 2008). A Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) pretendeu comparar dois sistemas de tanques de aquários marítimos:

- i. Tanque em FRP;
- ii. Tanque em betão armado.

O projeto do tanque em FRP foi elaborado pela empresa Kreysler & Associates, enquanto que o projeto do tanque em betão armado foi elaborado pela empresa Rutherford & Chekene. Dentro destes dois projetos a MBARI optou por escolher o tanque em FRP, mas com a condição da Kreysler & Associates elaborar uma ACV detalhada, certificando que o tanque em FRP seria a escolha ambientalmente mais sustentável. A síntese da análise realizada, que se detalha de seguida, procurou responder a esse requerimento específico, e no seguimento, para se conseguir qualificar e quantificar os impactos ambientais, o preço e o desempenho dos dois tanques. A informação resultante desta análise poderá ser generalizada e aplicada noutros sistemas de estudo.

### **5.3.2 Processos para a execução do tanque em FRP e em betão armado**

Antes de se entrar na análise detalhada da ACV, para se compreender os conceitos básicos do caso de estudo, vai-se definir o fluxo dos processos usados para a construção dos tanques em FRP e em betão armado.

O tanque em betão armado é produzido segundo a técnica tradicional que recorre ao uso de betão e aço. O betão, o aço e as cofragens de madeira são transportados por um camião até o local a serem implantados, para a construção do tanque. Depois da cofragem e armadura colocadas com o formato do tanque pretendido, através do auxílio de uma empilhadora, procede-se com a projeção do betão com uma bomba. Uma vez curado, a cofragem de madeira será devolvida ao contratante para futuramente ser reutilizada. O tanque em betão armado tem de funcionar durante 20 anos em serviço, uma vez passados, este sistema pressupõe que 100% do aço será recuperado. Embora seja presumível que

proceder com a separação total do aço no betão será um processo muito difícil, sendo que grande parte irá para aterro.

De seguida apresenta-se um fluxograma (Figura 5.9) com os processos do ciclo de vida do tanque em betão armado. E na Figura 5.10 ilustra-se o modelo tridimensional (3D) do tanque em betão armado.

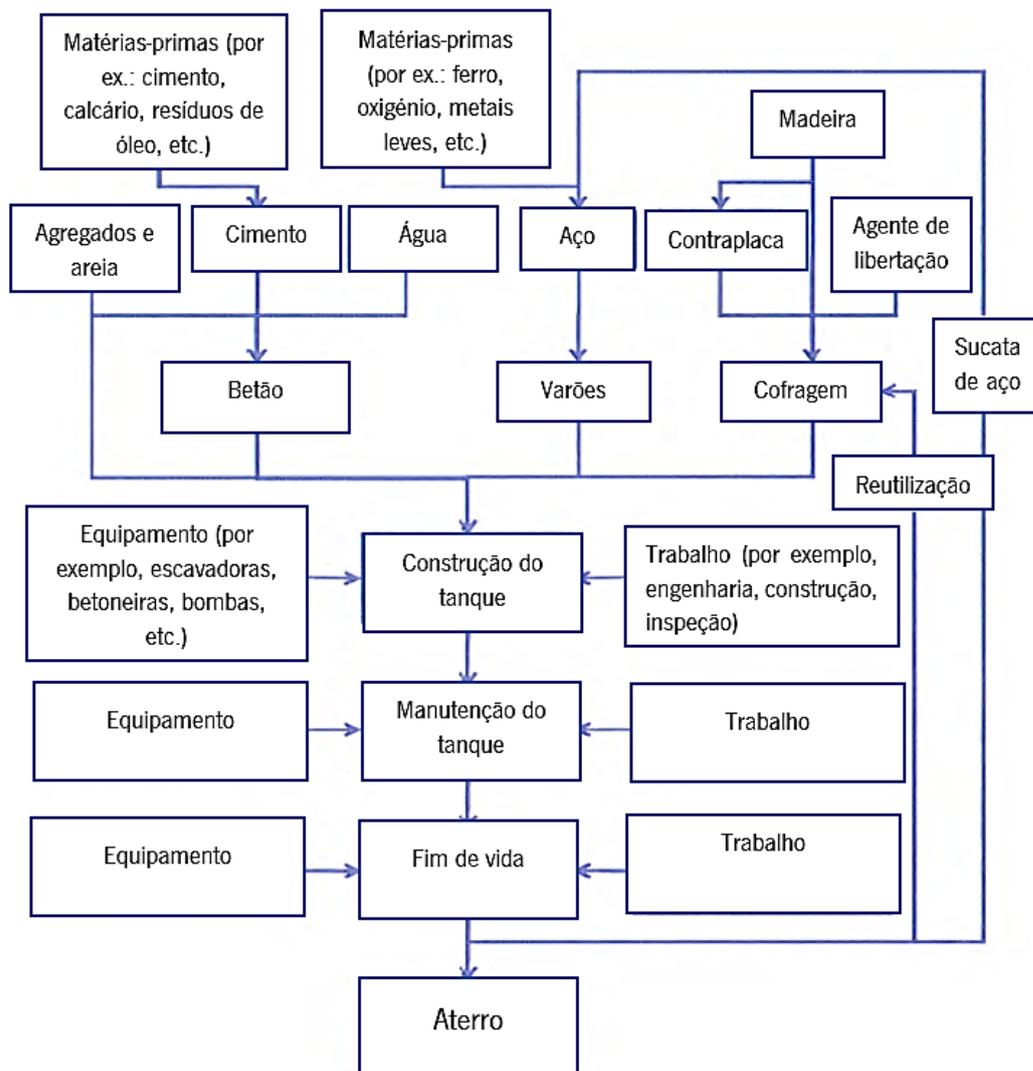


Figura 5.9 - Fluxograma do ciclo de vida do tanque em betão armado (adaptado de Fekka et al., 2008)

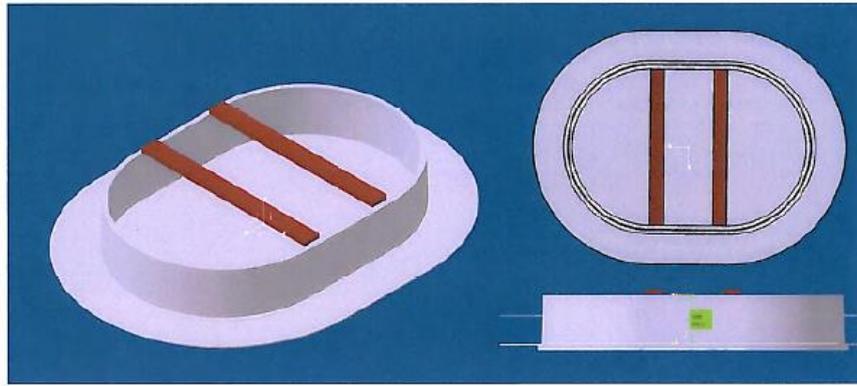


Figura 5.10 - Modelo 3D do tanque em betão armado (adaptado de Fekka et al., 2008)

Tanques em FRP, que são pouco comuns, são constituídos por fibras de vidro e por uma resina poliéster. Estes produtos são combinados e estabelecidos através de um processo *wet-hand lay-up*. A fibra de vidro é colocada em cima de um molde de aço encerado e, posteriormente, a resina é aplicada com um rolo, formando painéis de FRP. Estes necessitam de 4 a 5 horas de cura para conseguir que 95% da ligação entre os seus materiais constituintes seja conseguida. De seguida, aplica-se o jato de areia no molde para se obter uma superfície adequada e colocam-se barras de aço coladas com adesivo para o seu suporte.

Uma vez prontos, os painéis são transportados para o local a serem implantados e são aparafusados em conjunto de modo a definir a estrutura do tanque. Este tanque também tem de funcionar durante 20 anos em serviço. Uma vez passados, os painéis com FRP são retirados da estrutura metálica, para serem levados para o aterro. A estrutura metálica poderá ser reaproveitada. De seguida apresenta-se o modelo tridimensional do tanque de FRP (Figura 5.11) e um fluxograma (Figura 5.12) com os seus processos de ciclo de vida.

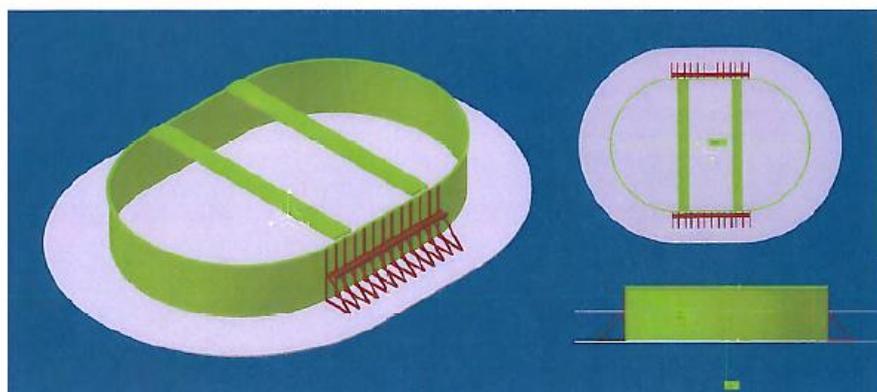


Figura 5.11 - Modelo 3D do tanque em FRP (adaptado de Fekka et al., 2008)

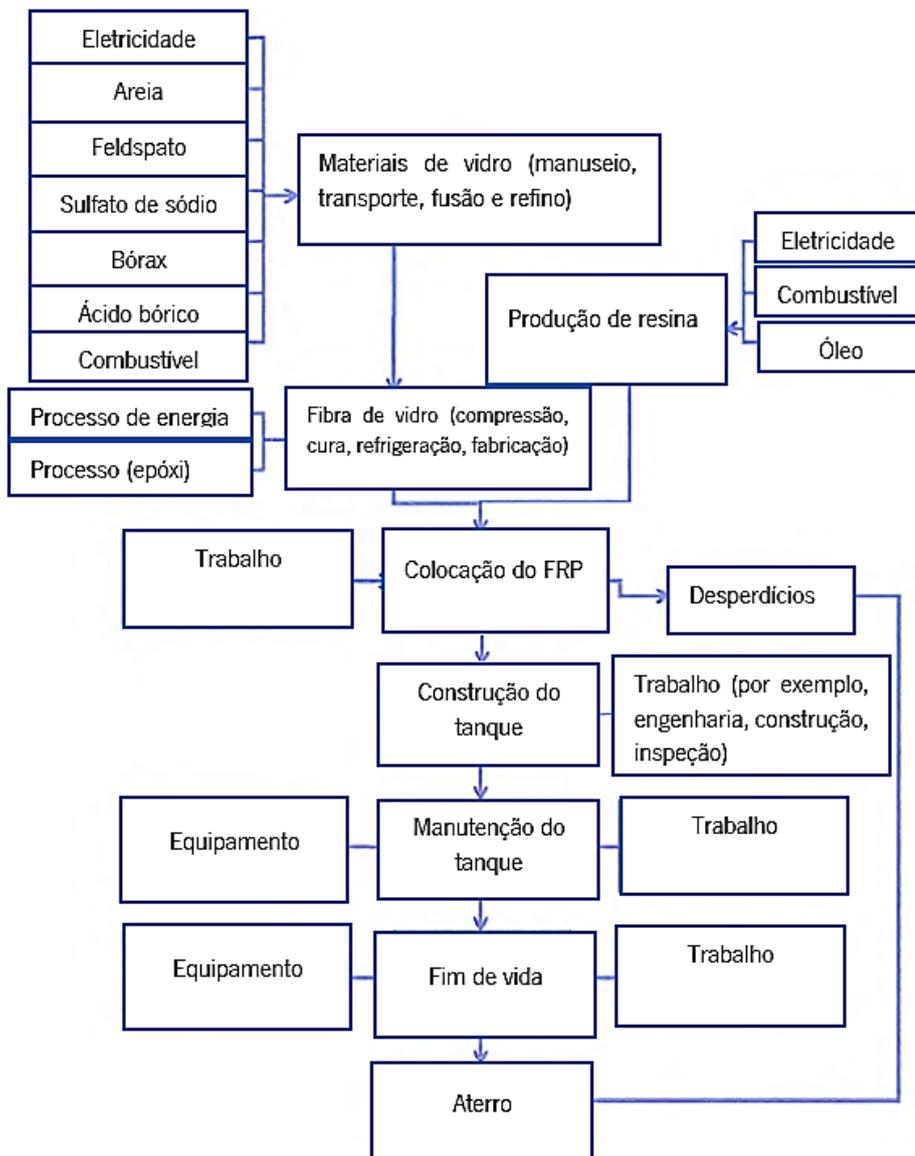


Figura 5.12 - Fluxograma do ciclo de vida do tanque em FRP (adaptado de Fekka et al., 2008)

### 5.3.3 Métodos de ACV, fronteiras do sistema, categorias de impacto e recursos de dados

Como já foi referido anteriormente, o objetivo deste caso de estudo consiste em realizar uma ACV de um tanque em FRP e compará-la com a ACV de um tanque em betão armado. A base de dados usada neste estudo foi o programa SimaPro.

O tanque para os dois sistemas de construção tem de apresentar 20 anos em serviço, sendo esta a unidade funcional utilizada na ACV desta análise. Os limites do sistema estão associados desde a fase

de produção dos materiais até o fim de vida dos tanques. Os processos e materiais adjacentes não foram considerados no limite do sistema. Tais como, por exemplo, o processo de bombear a água para dentro e fora do tanque e o gel aplicado para a proteção de ambos os tanques. Visto que se trata de uma ACV comparativa, não devem ser incluídos nos limites do sistema, qualquer processo que não tenha discrepância significativa entre os sistemas a comparar. Neste contexto, a fase de utilização não será integrada no limite do sistema, uma vez que não existe nenhuma diferença na maneira como os dois sistemas vão ser sustentados. A Tabela 5.2 exhibe as emissões e as categorias de impactos abrangidas nesta ACV.

Tabela 5.2 - Emissões e categorias de impacto ambiental (adaptado de Fekka et al., 2008)

<b>Emissões</b>	<b>Categorias de impacto</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dióxido de carbono;</li> <li>• Monóxido de carbono;</li> <li>• Óxido nitroso;</li> <li>• Dióxido de enxofre;</li> <li>• Compostos orgânicos voláteis;</li> <li>• Resíduos sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recursos de energia totais;</li> <li>• Gases de efeito estufa (GEE);</li> <li>• Acidificação;</li> <li>• Eutrofização;</li> <li>• Metais pesados;</li> <li>• Agentes cancerígenos;</li> <li>• Destruição da camada de ozono;</li> <li>• Poluição no verão;</li> <li>• Poluição no inverno;</li> <li>• Resíduos sólidos.</li> </ul>

Na avaliação do impacto que se segue, a análise incidirá particularmente sobre os recursos de energia totais, as emissões de GEE, os resíduos sólidos e por fim sobre a acidificação.

Embora esta ACV se baseie fundamentalmente na base de dados Eco-Indicator 99 do SimaPro, foram usadas outras fontes de dados que prestam assistência e esclarecimentos sobre algumas partes específicas do presente caso de estudo, apresentadas de seguida:

- Eco-Indicator 99 Database do software SimaPro (base de dados padrão);
- Owens Corning Advantex Glass Fiber: forneceu informações sobre reduções de emissões e como elevar o desempenho;
- Os dados de custo e produção foram fornecidos por Kreysler & Associates e MBARI;
- Os dados da resina de poliéster foram fornecidos por Ashland Chemical.

### 5.3.4 Análise do custo do ciclo de vida (ACCV)

Antes de se fazer uma avaliação do impacto ambiental para cada um dos sistemas em estudo, é útil fazer uma ACCV para compreender os fatores económicos em causa. Felizmente, estava disponível uma base de dados com uma estimativa de custos para o tanque em betão armado e para o tanque em FRP.

O preço de compra não é o único custo a ter em conta numa ACCV. Deve-se ter em conta também os custos associados à fase de fim de vida dos tanques, que estão associados ao transporte para os vazadouros e as taxas que são cobradas associadas às descargas dos resíduos. As taxas de *Monterey Regional Waste Management District* (local próximo da zona onde o tanque seria instalado) são cerca de 45 \$/tonelada de resíduos. Os autores do presente caso de estudo assumiram que o custo associado ao transporte foi assemelhado ao custo das taxas. A fase de utilização poderia ser outra potencial fonte de custo, mas esta não foi tida em conta porque não está integrada nos limites do sistema do estudo.

A Tabela 5.3 apresenta a separação das despesas por fase associadas a cada sistema, onde é possível concluir que o tanque em FRP quer na sua produção, quer na sua disposição final, é mais económico que o tanque em betão armado.

Tabela 5.3 - Preços associados aos dois tanques em análise (adaptado de Fekka et al., 2008)

	<b>Tanque de FRP</b>	<b>Tanque de Betão Armado</b>
Custos de Produção	1501935\$	1836763\$
Custos da Fase de Uso	-	-
Custo do Fim de Vida	4161\$	15537\$
<b>Total de Custo</b>	<b>1506096\$</b>	<b>1852300\$</b>

### 5.3.5 Fases de avaliação do impacto ambiental

#### 5.3.5.1 Fase de produção dos materiais

##### a) Pressupostos

As matérias-primas utilizadas para a produção do FRP são a fibra de vidro, a resina poliéster, o aço (para as barras) e o betão (para construir a base de apoio para o tanque). As entradas (*inputs*) destes materiais têm de ser quantificadas de modo a ter em conta um fator de 2% de desperdício para a resina e um fator de desperdício de 5% para as fibras de vidro. A fase de produção de material inclui a mão-de-obra e o jato de areia utilizado na superfície dos painéis de FRP. Relativamente a fase de produção da resina de poliéster, os autores do presente caso de estudo não conseguiram obter informações da quantidade de energia que é necessária para a sua produção. Portanto, optaram por usar resina epóxi, onde conseguiram obter os seus dados através da base de dados do *software* SimaPro.

As matérias-primas utilizadas na produção do tanque em betão armado são o betão, aço e madeira para a cofragem.

##### b) Resultados

Na Figura 5.13 ilustra-se um gráfico de impactos ambientais para cada componente de cada sistema presente no caso de estudo.

Na Figura 5.14 ilustra-se um gráfico “aranha” que faz a comparação dos impactos associados a cada sistema para cada categoria de impacto ambiental. De forma clara estes dados, mostram a superioridade em termos ambientais que o tanque em FRP apresenta sobre o tanque em betão armado na fase de produção dos materiais. O principal fator que leva a este acontecimento, é o facto de o tanque com betão armado necessitar de aço para reforçar o betão, apesar de este contribuir apenas em 4% do peso total do tanque, é devido à fase de produção do aço que ocorrem grande parte dos impactos ambientais resultantes da fase de produção do tanque com betão armado, tornando este menos ecológico que o tanque em FRP.

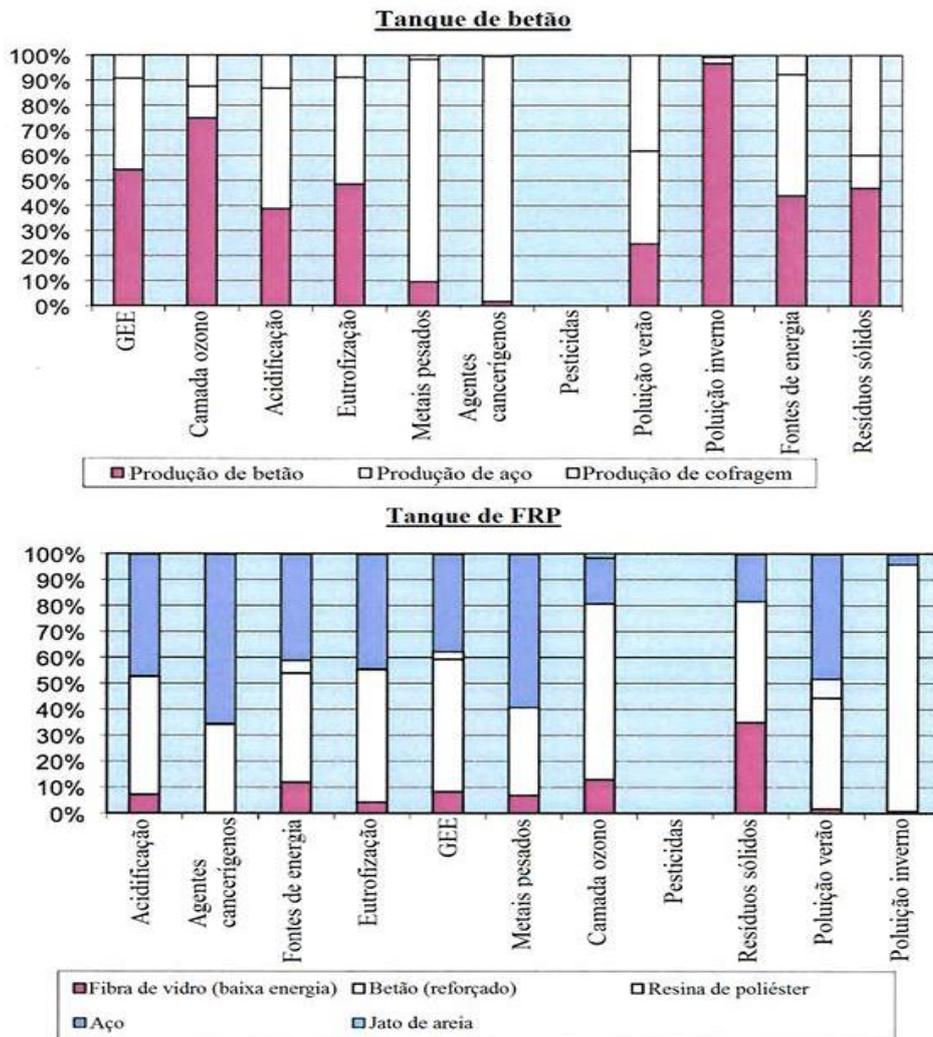


Figura 5.13 - Impactos ambientais da fase de produção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008)

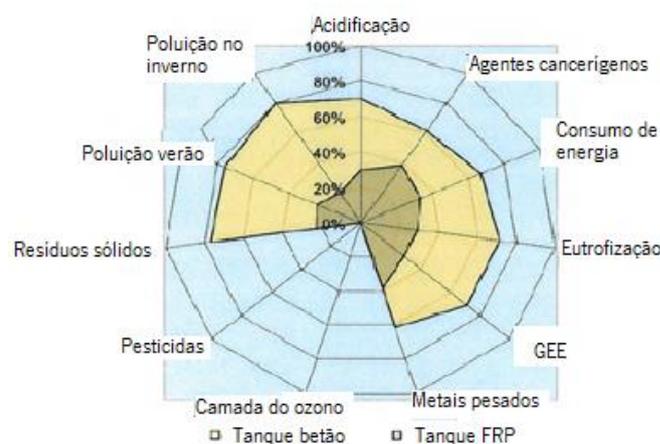


Figura 5.14 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de produção (reproduzido de Fekka et al., 2008)

### 5.3.5.2 Fase de transporte e de construção

#### a) Pressupostos

Na fase de transporte os painéis de FRP são transportados em três caminhões desde kreysler & Associates, localizado perto de Napa, até Monteray. Já o aço e o betão são transportados por caminhões desde Hayward até Monteray. A cofragem de madeira obtém-se no carpinteiro mais próximo, que se situa a 32,19 km de distância do local de construção.

Na fase de construção do tanque em FRP, recorre-se ao uso de uma empilhadora, com 50 cavalos de potência, que trabalha durante 16 horas para terminar com o processo de colagem dos painéis de FRP.

Na fase de construção do tanque de betão armado, também é usada uma empilhadora para a colocação das cofragens e das armaduras e é usada uma bomba injetora de betão, com 33 cavalos de potência, durante 6 horas.

#### b) Resultados

Na Figura 5.15 ilustra-se um gráfico “aranha” que compara os impactos resultantes da fase de construção e de transporte entre os sistemas em estudo em cada categoria de impacto.

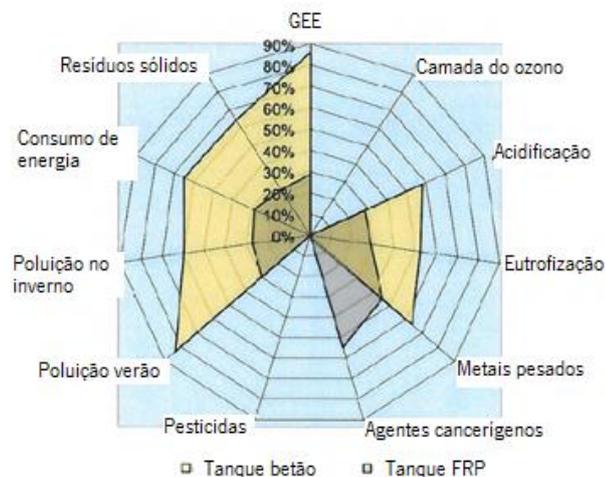


Figura 5.15 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de transporte e construção (reproduzido de Fekka et al., 2008)

Na Figura 5.16 ilustra-se gráficos com a percentagem de impacto associada a cada sub-processo incluído nesta fase.

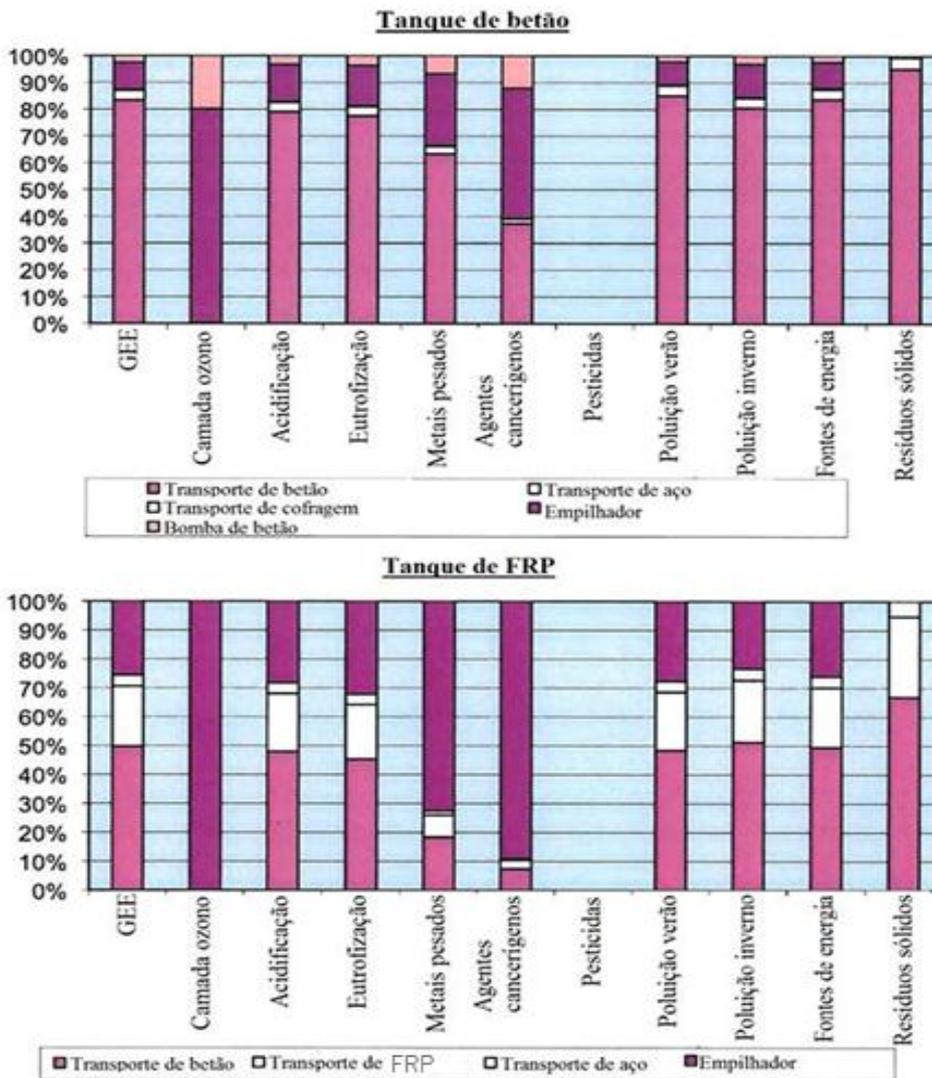


Figura 5.16 - Impactos ambientais da fase de transporte e construção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008)

Os resultados desta fase estão de acordo com o esperado, visto que o tanque em betão apresenta cerca de 80%, em peso, mais material do que o tanque em FRP, o que vai influenciar os impactos associados ao transporte dos mesmos. Apesar da distância de transporte para os materiais necessários para a construção do tanque de FRP ser maior, isto não é um aspeto suficientemente gravoso, de modo a que os seus impactos sejam superiores aos impactos resultantes pelo transporte dos materiais necessários para a realização do tanque de FRP.

### 5.3.5.3 Fase de fim de vida

#### a) Pressupostos

Todo o material de betão, aço e FRP vai ser depositado num aterro que fica aproximadamente a 13 km do local onde os tanques de aquário foram implantados. Para o tanque em FRP, todo o residuo resultante vai para aterro, à exceção das barras de aço que são 100 % recicláveis.

Para o caso do tanque em betão armado, o betão e o aço vão para o depósito de lixo municipal para serem posteriormente reciclados, todo o restante material será enviado para aterro. Assume-se que no processo de extração do aço do betão armado não haverá perdas. Relativamente à cofragem, cerca de 25% dos materiais resultantes são enviados para aterro e os restantes 75% são enviados para o fornecedor para serem reutilizados (o fornecedor fica a 41,84 km do local).

#### b) Resultados

Nesta fase tem-se em conta os impactos associados ao transporte dos resíduos para o aterro, assim como os impactos provenientes da decomposição dos resíduos no aterro. O software SimaPro subtrai os dados de inventário e os impactos associados a todos os materiais que são reciclados. Portanto, procede-se com a exclusão dos impactos resultantes dos materiais depositados em aterro.

A fim de obter um balanço adequado para a fase de fim de vida relativamente aos impactos, os autores do presente caso de estudo optaram por fazer uma análise dos impactos por duas maneiras.

Na primeira, extraíram dados do SimaPro, com o intuito de comparar os resultados dos impactos ligados ao aterro do betão, FRP e cofragem. O aço não foi tido em conta uma vez que é 100% reciclado. Estes dados são expostos na Figura 5.17, onde é possível observar-se que o tanque em FRP apresenta menos impactos na fase de fim de vida que o tanque de betão armado.

Na segunda, afirmam que outra maneira mais precisa de comparar os impactos resultantes da fase de fim de vida para os dois sistemas em análise é ignorar os impactos negativos de reciclagem de líquidos e apenas ter em conta os impactos positivos de aterro numa escala relativa. Estes dados são apresentados na Figura 5.18, onde se pode ver numa perspetiva mais realística a comparação entre a fase de fim de vida dos dois tanques em análise.

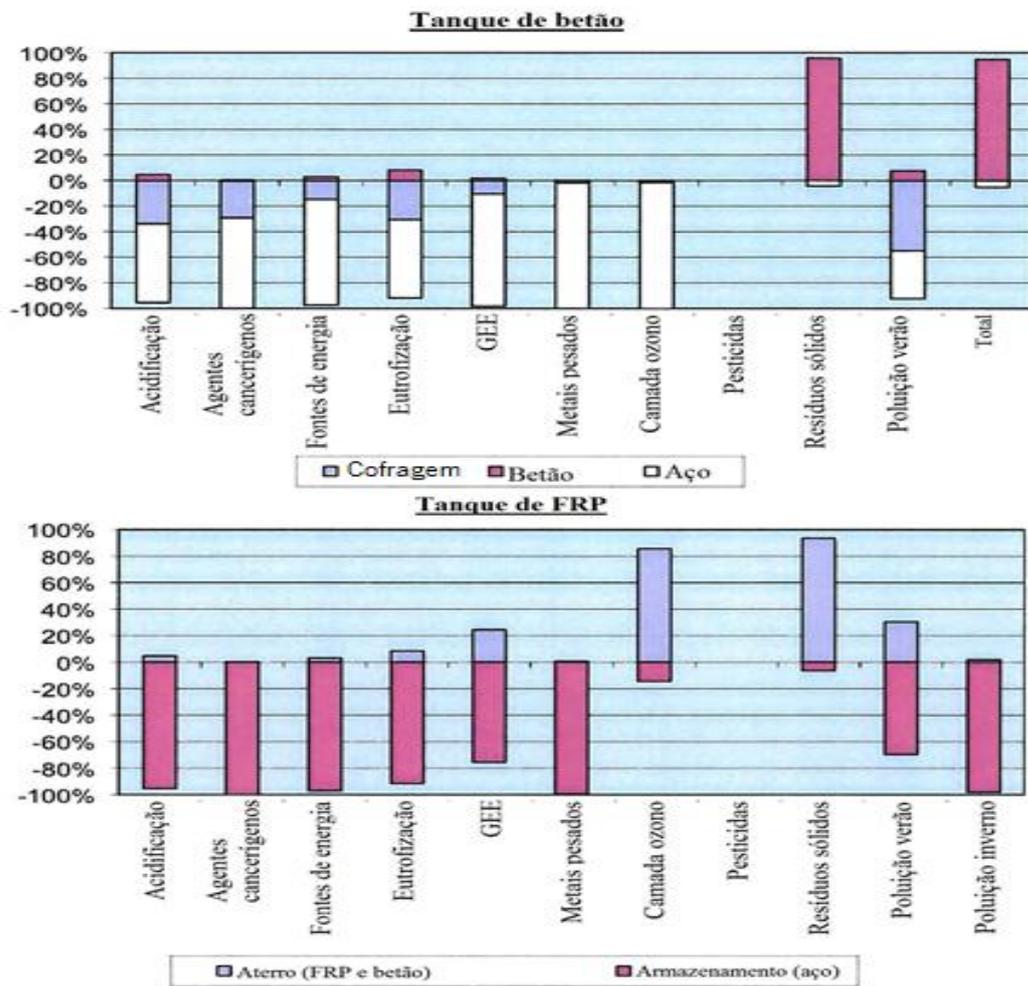


Figura 5.17 - Impactos ambientais da fase de transporte e construção de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008)

É de notar, que existe uma maior percentagem no consumo de recursos energéticos no fim de vida do tanque em betão armado, o que faz sentido, uma vez que há um maior consumo de energia na fase de transporte dos resíduos para o aterro, isto devido ao facto destes apresentarem maior peso específico.

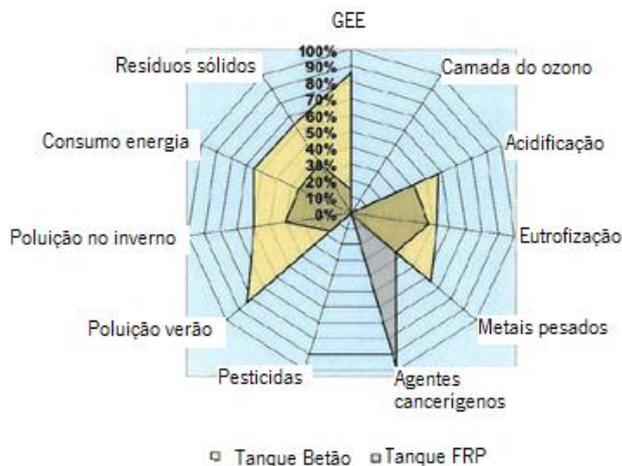


Figura 5.18 - Comparação da percentagem das categorias de impacto para cada sistema na fase de fim de vida (reproduzido de Fekka et al., 2008)

### 5.3.6 Avaliação dos impactos totais

Reverendo todos os processos de avaliação de impactos anteriormente analisados, é possível concluir que o tanque em FRP é claramente o sistema que tem menor impacto ambiental em todas as categorias. De seguida apresenta-se a Tabela 5.4 que resume a vantagem absoluta que o tanque de FRP tem sobre o tanque de betão armado em cada categoria de impacto.

Tabela 5.4 - Valores das diversas categorias de impacto associadas ao ciclo de vida dos sistemas em análise (adaptado de Fekka et al., 2008)

Categoria de Impacto	Betão	FRP	Diferença	Diferença (%)
Acidificação (kg S02)	271,5325	118,2368	153,2957	130
Agentes Cancerinos (kg B(a)P)	0,008818	0,005539	0,00327931	59
Recursos de Energia (MJ)	560042,3	278286,3	281755,998	101

Tabela 5.4 - Valores das diversas categorias de impacto associadas ao ciclo de vida dos sistemas em análise (continuação)

Categoria de Impacto	Betão	FRP	Diferença	Diferença (%)
Eutrofização (kg PO4)	28,02	11,75	16,26	138
Gases de Efeito Estufa (kg CO2)	36497,22	16552,51	19944,70	120
Metais Pesados (kg Pb)	0,30	0,19	0,11	58
Camada de Ozono (kg CFC11)	0,0009	0,000647	0,0002	38
Pesticidas (kg act.sub)	0	0	0	-
Resíduos Sólidos (kg)	283064,0	77187,87	205876,13	367
Poluição no Verão (kg C2H4)	283,064	7,34	11,25	153
Poluição no Inverno (kg SPM)	3366,19	841,6	2524,44	300

Para se compreender melhor as diferenças dos impactos associados ao ciclo de vida dos dois tanques presentes neste caso de estudo, seguem-se a Figura 5.19 e a Figura 5.20.

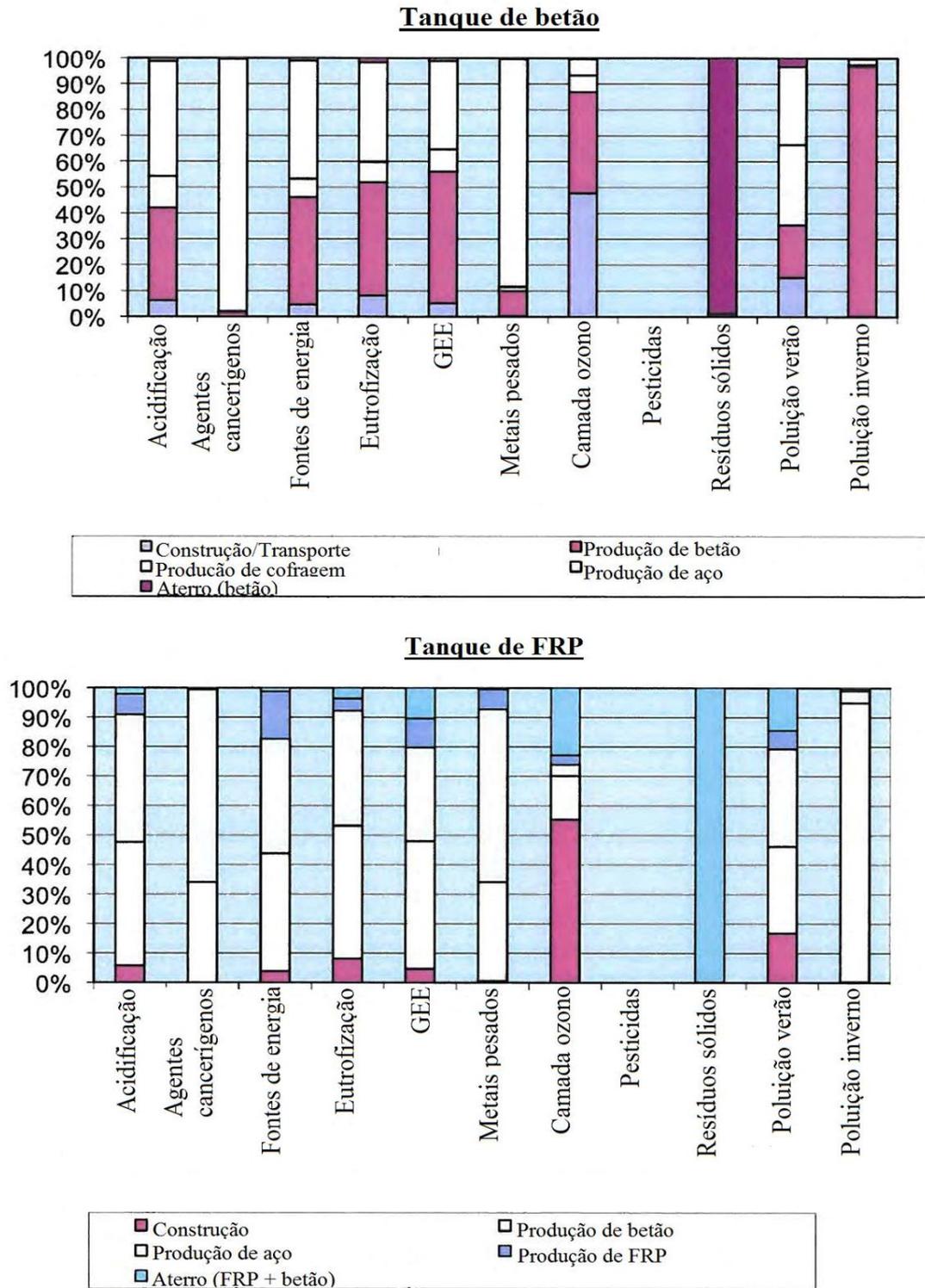


Figura 5.19 - Total de impactos ambientais no ciclo de vida de cada sistema (reproduzido de Fekka et al., 2008)

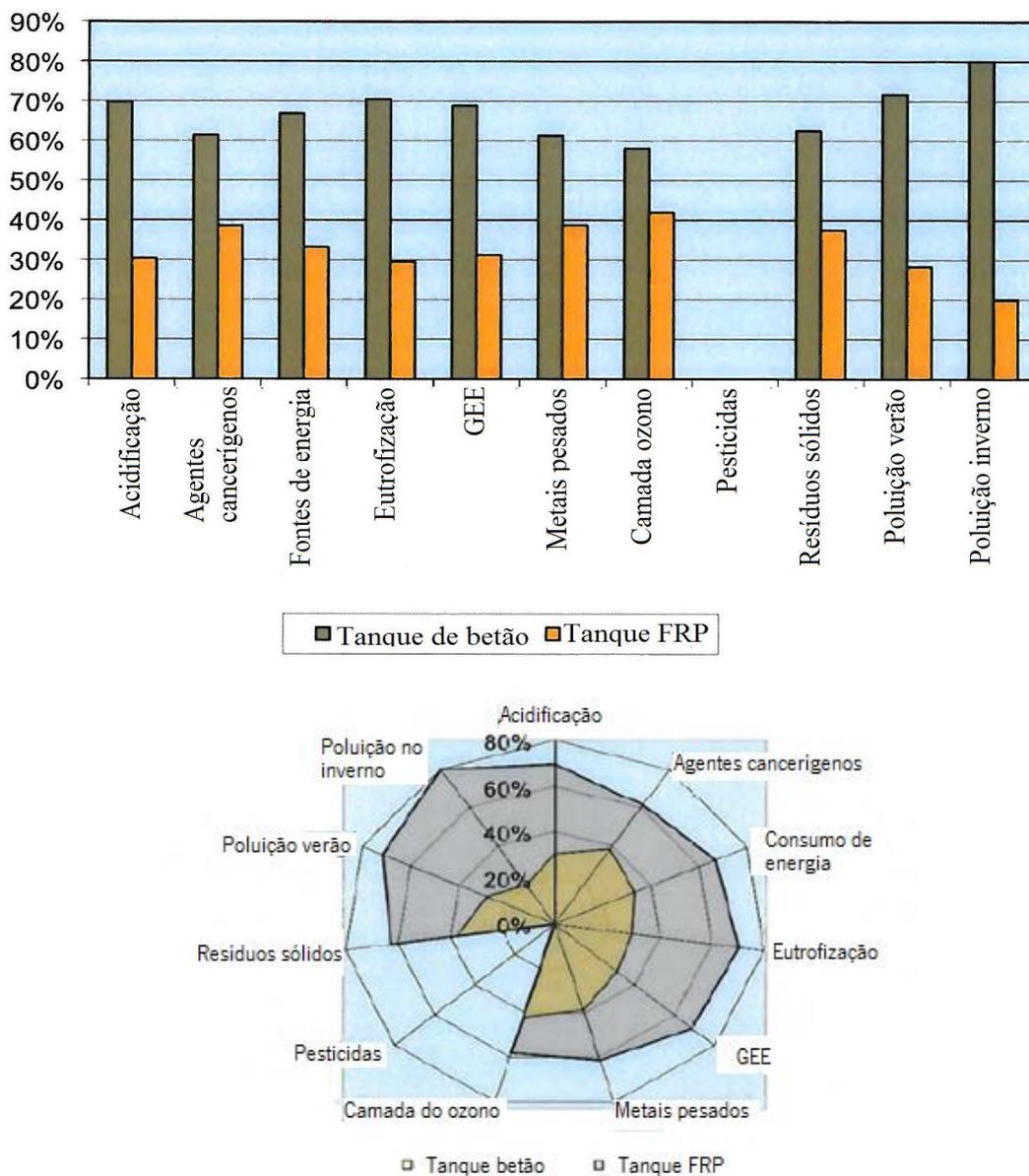


Figura 5.20 - Comparação da percentagem do total de impactos ambientais no ciclo de vida dos sistemas (reproduzido de Fekka et al., 2008)

### 5.3.7 Recomendações

Nesta secção final, abordou-se os processos que poderiam ser melhorados no sistema de tanque de FRP, de modo a que este reduzisse os seus impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida. O que o tornaria ainda mais eficiente e ecológico que o tanque de betão armado.

A primeira sugestão para melhorar o sistema de FRP seria substituir o processo de aplicação da camada protetora através do jato de areia por um sistema de rolo. Não só devido à energia que consome, como também devido aos desperdícios que produz, a utilização do jato de areia no tanque, apesar de ser o processo menos útil de todos os processos que a fase de construção abrange, é dos procedimentos que gera mais impactos ambientais.

Outra sugestão seria fazer o método de *wet-layup* em vácuo, de modo a que as suas emissões possam ser capturadas e não libertadas para a atmosfera, que foi o que se sucedeu no presente caso de estudo.

Por fim, uma sugestão para a melhoria a longo prazo dos FRP seria encontrar uma maneira eficaz em termos de custos de reciclagem para os FRP no seu fim de vida, em vez de irem para o vazadouro. Uma das razões pelas quais o aço não tem impactos ambientais significativos no ciclo de vida dos dois sistemas analisados deve-se ao facto deste ser reciclado. Existem grandes problemas com o processo de reciclagem nos FRP, visto que se trata de um material compósito seria muito difícil separar os seus materiais constituintes. Se a tecnologia fosse desenvolvida para tornar este processo de separação mais eficaz, conseguir-se-ia obter um menor valor de impactos ambientais associados ao ciclo de vida do sistema de FRP.

A pesquisa efetuada inicialmente pelos autores do presente caso de estudo indicou que o processo de reciclagem de FRP pode ser muito rigoroso e complexo. Empresas de produção de FRP no Japão tentaram reciclar o FRP ao incinerá-los a fim de produzir energia na forma de calor para produzir energia elétrica, mas em contrapartida esta solução não era ecológica, pois gerava grandes quantidades de emissões atmosféricas.

Nos EUA existe apenas uma empresa que realiza reciclagem de FRP, comercialmente viável. A viabilidade do seu método foi citada num trabalho sobre a reciclagem de FRP publicado por *Minnesota Technical Assistance Program* e está disponível online (Bartholomew, 2004). Esta empresa possui uma linha completa de equipamentos de reciclagem de FRP comerciais e um departamento de consultoria para projetar soluções personalizadas para os seus clientes. Os autores do presente caso de estudo referem que este método deveria ser abordado na ACV do tanque em FRP efetuada por Kreysler & Associates.



## **Capítulo 6**

### **CONCLUSÕES**

#### **6.1 Considerações finais**

A concretização deste trabalho permitiu alargar os conhecimentos sobre a aplicação da ferramenta de ACV de acordo com as normas ISO 14040 e ISO 14044 e sobre o comportamento de elementos estruturais reforçados com as técnicas de reforço EBR, NSM e tradicionais. Assim, neste capítulo são demonstradas em síntese as conclusões mais importantes das secções presentes na dissertação. No final, apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

A presente dissertação tinha como objetivo inicial fazer a comparação da análise do ciclo de vida entre as técnicas de reforço que recorrem ao uso laminados de CFRP, tais como a técnica EBR e NSM, com a técnica tradicional de encamisamento com adição parcial de betão armado. Com o propósito de se poder avaliar e interpretar a técnica com menos impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida, isto é, desde a sua fase de aquisição de matérias-primas, passando pela fase de produção, distribuição e utilização, até à sua disposição final. Devido à falta de informação e à escassez de bases de dados das empresas contactadas sobre a avaliação e quantificação das entradas e saídas ao longo do ciclo de vida dos laminados de CFRP não foi possível efetuar este estudo pretendido. Posto isto, optou-se por criar uma base de dados para uma futura ACV de vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM, bem como proceder à análise detalhada de dois casos de estudo aplicados na engenharia civil.

Na presente dissertação foi possível analisar e compreender as metodologias de cálculo expostas nas propostas normativas da ACI 440.2R-08 (2008) e CNR-DT 200 (2004) para a verificação da segurança

à flexão em relação aos estados limite últimos (ELU) de elementos estruturais de betão armado reforçados com laminados de CFRP. Foi apresentada uma viga tipo que cumpre todos os limites impostos pelo EC2 no que respeita a ELU e ELS. Esta foi posteriormente submetida a uma sobrecarga extra o que levou à necessidade de ser reforçada, para isso, foram efetuados cálculos de reforço à flexão utilizando a técnica EBR, NSM e de encamisamento com betão armado. Conclui-se que a técnica de reforço NSM mostrou ser mais eficaz em relação a vários parâmetros quando comparada com as restantes técnicas de reforço estudadas na presente dissertação.

O primeiro caso de estudo refere-se à comparação da ACV da técnica de reforço com aplicação de CFRP com a técnica de encamisamento com adição de chapas metálicas. Neste estudo é possível verificar notoriamente a superioridade que a técnica de reforço com recurso a CFRP traz sobre a técnica de reforço tradicional de encamisamento em todos os impactos ambientais por ele abordados. Esta discrepância dá-se, fundamentalmente, devido ao facto das fibras de carbono corresponderem apenas de 3.33% do peso total da solução em chapas de aço para obterem a mesma capacidade de carga no elemento reforçado, o que implica, menores impactos ao longo do seu ciclo de vida.

O segundo caso de estudo refere-se à comparação da ACV de um tanque de FRP com um tanque de betão armado. Neste estudo são qualificados e quantificados os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de cada sistema. Na fase de produção, de transporte e construção, e na fase de fim de vida é possível verificar, através dos diversos gráficos apresentados e analisados no presente caso de estudo, que o tanque de FRP é o sistema que apresenta menores impactos ambientais. Além desta análise, também é demonstrado um estudo do custo de ciclo de vida de cada tanque, onde é possível verificar que o tanque de FRP quer no seu processo de fabrico, quer na sua disposição final apresenta menores custos que o tanque de betão armado. Em geral, pode-se concluir que os sistemas que utilizam materiais compósitos na sua produção são mais económicos e ecológicos.

## **6.2 Desenvolvimentos futuros**

Com base na informação desenvolvida ao longo da presente dissertação, é importante identificar possíveis sugestões em relação a desenvolvimentos que se possam efetuar no futuro tendo em conta o conteúdo deste trabalho. De seguida, seguem-se estes possíveis desenvolvimentos:

- Divulgar e incentivar o uso da ferramenta ACV nas diversas áreas de engenharia civil;

- Desenvolver uma ACV detalhada dos sistemas pré-fabricados utilizados no reforço de elementos estruturais, nomeadamente os laminados de CFRP;
- Criar uma ACV das técnicas de reforço EBR e NSM.



## Referências Bibliográficas

- ACI 440.2R-02 (2002). Guide for the Design and Construction of Externally bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, 45 pgs.
- ACI Committee 440 (1996). State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. ACI 440 R-96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Alcobia, B. A. (2004). Desenvolvimento de um modelo conceptual para a Análise do Ciclo de Vida (ACV) de tecnologias de tratamento e valorização de óleos usados. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 130 pgs.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440.2R (2008) - Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, Michigan, USA.
- APPLETON, J., GOMES, A. (1997). Reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das secções. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), nº42
- Azevedo, D., Juvandes, L. F. P., Henriques, A. (2004) - Reforço à flexão com sistemas de FRP - comportamento experimental vs. manuais actuais de dimensionamento. Encontro Nacional Betão Estrutural. FEUP, Porto.
- Barros, J.A.O., (2007) “Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão-parte 1:propriedades e técnicas”, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal.
- Bartholomew, K. (2004). “Fiberlass Reinforced Plastics Recycling”. Minnesota Technical Assistance Program.
- BASF Mbrance CF 130 Data Guide. Shakopee, MN: BASF Construction Chemicals, LLC – Building Systems; 2007.
- Beber, A. J. (2003). Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono. Tese de Doutoramento. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Julho, 289 pgs.
- Bragança, L., Pinheiro, M., Mateus, R., (2013). Portugal SB13-*Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets*, Guimarães, 30 Outubro-1 de Novembro, Portugal;

- Brundtland, G. (1987). Our common future: The world commission on environment and development. Oxford: Oxford University Press.
- Carneiro, L. A. V., Teixeira, A.M.A.J. (2008) Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção.
- Carvalho, T. S. (2010). Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Estruturas e Geotecnia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Setembro, 185 pgs.
- Chehebe, J. R. B. (1997) Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark.,CNI.
- CIB (1999). *Agenda 21 on sustainable construction*, CIB Report Publication 237;
- CNR-DT 200/2004 (2004). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. National Research Council – Advisory Committee on Technical Recommendations for construction, Rome – Italy.
- Coelho, M., Silva, L., Sena-Cruz, J.M., Barros, J. (2011) “Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP’s sob acções monotónicas e de fadiga.” Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas
- Costa, A., Vila Pouca, N., Romão, X., Paupério,E., Lopes, V. (2009) “Reforço e reabilitação de estruturas de betão armado-intervenções.” Seminário Internacional de Reforço e Reabilitação-Porto.
- Costa, R. L.da, (2009) Durabilidade de perfis pultrudidos de poliéster reforçado com fibras de vidro (GFRP). Tese de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Novembro. 187 pgs.
- Cruz, J. S., Barros, J. A. O., Dias, S. (2011). 1ºSeminário sobre o projecto de reforço de estruturas de betão com FRP`S. Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil
- Das S. (2011). Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. Int J Life Cycle Assess; 16:268-282.

- Dias, S. J. E. (2008) Investigação experimental e analítica no reforço ao corte de vigas de betão armado com técnica de inserção de laminados de CFRP. Tese de Doutoramento. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Julho, 391 pgs.
- Dias, S., Barros, J. A. O. (2011). Materiais compósitos no reforço ao corte de vigas de betão armado. ISISE. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O., (2004). Materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado, Relatório técnico 04-DEC/E-03, DEC-EEUM, 66 pgs.
- Environmental Protection Agency-EPA (1993). Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles. EPA/600/R-92/245. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, USA.
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency. (2006). Life cycle assessment: Principles and practice. Cincinnati, Ohio.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010
- Fekka, E., Flager, F., Frieden, N., Mercer, T., Russel-Smith, S. (2008). LCA Comparison of Two Aquarium Tank Systems: Fiber-Reinforced Plastic and Concrete. CEE 226:Life Cycle Analysis. Final Term Project.
- Ferrão, P. (1998). Introdução à Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos. Portugal: IST Press, Lisboa.
- Ferreira, J. V. R. (2004). Análise de ciclo de vida dos produtos. Gestão Ambiental. Instituto Politécnico de Viseu. 80 pgs.
- Garcez, M. R. (2007). Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras. Tese de Doutoramento. Universidade Federal do Rio do Sul, Porto Alegre, Abril, 241 pgs.
- Hollaway, L. C. (1993). Polymer Composites for civil and structural engineering. Glasgow, Blackie Academic and Professional.

- Hunt, R. e Franklin, E., (1996). LCA - How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *Int. J. LCA, vol. 1 (1)* 4-7. Landsberg, Germany: Ecomed
- ISO 14040 (1997). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO – International Standard Organization. Genève, Switzerland.
- ISO 14044 (2006). Environmental management - Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines. Genève: Switzerland.
- Jalali, S., Silva, B.J. (2002). Construção Sustentável-Parque de Exposições de Braga, Portugal 19 de setembro. Universidade do Minho.
- Joshi, S., Gentry, R., Gamble, M. Bayer, C. (2010). AIA guide to building life cycle assessment in practice. Published by the American institute of Architects. Washington, DC 20006.
- Júnior, A. F. B., Morais, R. M. de, Emerenciano, S. V., Handson, C. D. P., Gouvinhas, R. P. (2008). Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo Vida (ACV) no Brasil. *Revista Gerenciais*, São Paulo, v. 7, n.1, pgs.39-44.
- Juvandes, L. F. P. (1999). Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de CFRP. Tese de Doutoramento, FEUP, DECIVIL, Porto, Setembro, 400 pgs.
- Juvandes, L. F. P., Marques A. T. e Figueiras, J.A. (1996 a) Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão. Relatório técnico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Março, 112 pgs.
- Juvandes, L., (2011). Aplicações de compósitos em reforço de estruturas, 1as Jornadas de Materiais na construção, LABEST/Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.pgs.239-270.
- KIBERT, C. J. (1994). Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction, Proceedings of the First International Conference on Sustainable Construction of CIB TG 16. pp. 917. Center for Construction and Environment, University of Florida, Tampa, Florida.
- Lippiatt, B. C. (2002). BEES 3.0: Building for Environmental for Economic Sustainability Technical Manual e User Guide. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology. 191 pgs.

- MATTHYS, S., (2000). Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement. D.Sc. Thesis, University of Ghent, Ghent, Belgium.
- Meier,U. (1995). Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. *Construction and Building Materials*, volume 9, número 6. pgs.341-351.
- Meneghetti, L.C. (2007). Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida. Tese de Doutorado. Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 277 pgs.
- NBR ISO 14042:Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida, publicada em Julho de 2004.
- NP EN 1504-1, (2006). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)
- Oliveira, R. F, B. de, (2013). Modelação e reforço de vigas de betão armado com laminados de fibra de carbono. Tese de Mestrado. Instituto superior de engenharia do Porto. Outubro. 135 pgs.
- Orlando, F. L. (2014). How to know if and when it`s time to commission a life cycle assessment. International Council of Chemical Associations.
- Pivatto,A.B. (2014). Reforço Estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono. Trabalho de graduação apresentado à disciplina. Trabalho de Final de Curso II do curso de Engenharia Civil do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, 108 pgs.
- Potyrala, P. B. (2011). “Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures.”. 93 pgs.
- Ramos, T.B., Cecilia, T., Melo, J.J. (2008). Environmental impact assessment in higher education and training in Portugal. *Journal of Cleaner Production*. V.16. pgs. 639-645.
- Rodrigues, C. C. (2005). Reparação e reforço de estruturas de betão armado com sistemas compósitos de FRP. Publicação UNIC – DTC6 - -MAIO.

- Rodrigues, T. J. S., (2009). Reforço de estruturas com FRP`s. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro. Universidade de Aveiro.
- Santos, A. C., Mendes, P., Ribau Teixeira, M. (2011). Estratégia de sustentabilidade para a aplicação da análise do ciclo de vida à gestão de resíduos de construção e demolição em serviços municipais. Trabalho apresentado em 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos. In Actas das 7ª Jornadas Técnicas Internacionais de Resíduos, Porto.
- SETAC-SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (1991). A Technical Framework for Life-Cycle Assessment. SETAC Foundation for Environmental Education, Inc, Washington, DC.
- Silva, A. R. de A. (2014). Análise comparativa de estudo de Avaliação do Ciclo de Vida da madeira. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro. 68 pgs
- Silva, H. P. da, (2014). Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra.240 pgs.
- Silva, J. R. da, (2014). Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro. Tese de Doutoramento. Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 23 de Maio. 245 pgs.
- Silva, L. F. F. T. da, (2010). Eficiência de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas submetidas a acções monotónicas e de fadiga. Tese de mestrado. Universidade do Minho, Outubro,110 pgs.
- Silva,M. (2011/2012). Reabilitação Sustentável: Adaptação conceptual de um edifício do século XIX do Centro do Porto. Retirado em 15 de Julho,2015 de <http://comum.rcaap.pt/handle/123456789/5025>.
- Sonnemann, G., Castells, F., Schuhmacher, M. (2004). Integrated life-cycle and risk assessment for industrial process. London: CRC Press
- Sousa, Á. F. V. da S. (2008). Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Setembro. 88 pgs.
- Sousa, J. P. G. M. de, (2011). Durabilidade de perfis pultrudidos de viniléster reforçado com fibras de vidro (GFRP). Tese de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Outubro 2011, 254 pgs.

- Umair S. (2006). Environmental impacts of fiber composite materials. Mater Thesis, Royal Institute of Technology.
- Vegt OMD, and Haije WG. (1997). Comparative environmental life cycle assessment of composite materials ECN-I-97-050.
- wikipédia. (2012). Obtido de wikipédia:  
[https://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra\\_de\\_carbono#/media/File:Cfaser\\_haarrp.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono#/media/File:Cfaser_haarrp.jpg)
- Wolf, Marc-Andree, Pant, R., Chomkham Sri, K., Sala, S., Pennington, D., (2012) The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe. Consultado em 13/10/2015, disponível em <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC66506>.
- Zhang X, Yamauchi M, and Takahashi J. Life cycle assessment of CFRP in application of auto mobile. 18th International Conference on Composite Materials.
- Zhou H, Attard TL. Rehabilitation and strength sustainability of fatigue damaged concrete-encased steel flexural members using a newly developed polymeric carbon-fiber composite. *Comp Part B: Eng* 2013;45:1091-103.
- Zhou, H. (2013). "The comparative Life Cycle Assessment of Structural Retrofit Techniques". Arizona State University. SSEBE-CESEM-2013-CPR-009.



## **Anexos**



## **Anexo I**



**Características dos materiais:**

- Betão C25/30

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \times \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1.0 \times \frac{25}{1.5} = 16.6667 \text{ MPa} \quad 1.1$$

Em que,

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2.6 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 31 \text{ GPa}$$

- Aço para varões A400NR

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1.15} = 347.83 \text{ MPa} \quad 1.2$$

Em que,

$$f_{yk} = 400 \text{ MPa}$$

- Cálculo da altura útil:

Altura útil (d):

$$d = h - \text{Rec}_{inf} = 0.7 - 0.035 = 0.665 \text{ m} \quad 1.3$$

Em que,

$$\text{Rec}_{inf} = 3.5 \text{ cm} \quad \text{Rec}_{sup} = 3 \text{ cm}$$

**Estados Limite Últimos**

Cálculo do momento fletor resistente admitindo o bloco retangular para a distribuição de tensões no betão:

Hipóteses de cálculo admitidas para o comportamento dos materiais:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Betão - Bloco retangular de tensões} \\ \text{Aço - Diagrama elástico - perfeitamente plástico} \end{array} \right. \quad 1.4$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cu3} = 3.5\% ; \lambda = 0.8 ; \eta = 1.0 \\ \varepsilon_s = \infty \end{array} \right.$$

Condições iniciais:

$$\begin{cases} \text{Rotura pelo betão} \\ \text{Aço plastificado} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon_c = \varepsilon_{cu3} \\ \varepsilon_s = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{347.8261}{200 \times 10^3} = 1.74\text{‰} \end{cases} \quad 1.5$$

Equações de equilíbrio:

$$\begin{cases} \Sigma M = 0 \\ \Sigma F = 0 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} M_{Rd} = F_c \times z = F_s \times z \\ N_{Rd} = F_c - F_s \end{cases} \quad 1.6$$

Como  $N_{Rd} = 0$  (flexão simples) a 2ª equação do sistema anterior conduz a  $F_c = F_s$ .

Definindo então cada uma das forças envolvidas:

$$\begin{cases} F_c = f_{cd} \times 0.8x \times b = F_s \times z \quad (\text{área do retângulo que multiplica pela largura da secção}) \\ F_s = A_s \times f_{yd} \end{cases} \quad 1.7$$

A força de compressão no betão é dada por:

$$F_c = f_{cd} \times 0.8x \times b = 16.6667 \times 10^3 \times 0.8 \times x \times 0.3 = 4000.01x \quad 1.8$$

Uma vez que todas as forças já estão definidas, então pode resolver-se a equação de equilíbrio:

$$\begin{aligned} F_c &= F_s \\ \Leftrightarrow 4000.01x &= 682.79 \\ \Leftrightarrow x &= 0.170697 \text{ m} \end{aligned} \quad 1.9$$

É necessário agora verificar se todas as condições iniciais admitidas são verdadeiras. Admitiu-se que a armadura estava plastificada, o que só é verdade quando:

$$\varepsilon_s > \frac{f_{yd}}{E_s} = 1.74\text{‰} \quad 1.10$$

$$\frac{\varepsilon_{cu3}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \Leftrightarrow \frac{3.5}{0.170697} = \frac{\varepsilon_s}{0.665 - 0.170697} \Leftrightarrow \varepsilon_s = 10.14 > 1.74\text{‰} \quad 1.11$$

Assim, confirma-se que as armaduras de tração se encontram em regime plástico. O cálculo efetuado para determinação da posição do eixo neutro é válido.

Voltando às equações de equilíbrio, pode considerar-se agora a 1ª equação onde se estabelece o equilíbrio de momentos:

$$\begin{aligned}
 M_{Rd} &= F_c \times z = F_s \times z \Leftrightarrow \\
 \Leftrightarrow M_{Rd} &= 4000.01 \times 0.170697 \times (0.665 - 0.4 \times 0.170697) \\
 \Leftrightarrow M_{Rd} &= 407.435 \text{ kN.m}
 \end{aligned}
 \tag{I.12}$$

## Estados Limite de Serviço

Combinações de ações:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } Q_{k,1}
 \tag{I.13}$$

$$Ped_{(SLS)carac,i} = 35 + 10 = 45 \text{ kN/m}
 \tag{I.14}$$

$$M_{Ed(SLS)carac,i} = 45 \times \frac{7^2}{8} = 275.6 \text{ kN.m}
 \tag{I.15}$$

$$Ped_{(SLS)carac,f} = 35 + 16 = 51 \text{ kN/m}
 \tag{I.16}$$

$$M_{Ed(SLS)carac,f} = 51 \times \frac{7^2}{8} = 312.4 \text{ kN.m}
 \tag{I.17}$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } \Psi_{1,1} Q_{k,1}
 \tag{I.18}$$

$$Ped_{(SLS)freq,i} = 35 + 0.5 \times 10 = 40 \text{ kN/m}
 \tag{I.19}$$

$$M_{Ed(SLS)freq,i} = 40 \times \frac{7^2}{8} = 245 \text{ kN.m/m}
 \tag{I.20}$$

$$Ped_{(SLS)freq,f} = 35 + 0.5 \times 16 = 43 \text{ kN/m} \quad 1.21$$

$$M_{Ed(SLS)freq,f} = 43 \times \frac{7^2}{8} = 263.4 \text{ kN.m/m} \quad 1.22$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ " + " } \Psi_{2,1} Q_{k,1} \quad 1.23$$

$$Ped_{(SLS)qp,i} = 35 + 0.3 \times 10 = 38 \text{ kN/m} \quad 1.24$$

$$M_{Ed(SLS)qp,i} = 38 \times \frac{7^2}{8} = 232.8 \text{ kN.m/m} \quad 1.25$$

$$Ped_{(SLS)qp,f} = 35 + 0.3 \times 16 = 39.8 \text{ kN/m} \quad 1.26$$

$$M_{Ed(SLS)qp,f} = 39.8 \times \frac{7^2}{8} = 243.8 \text{ kN.m/m} \quad 1.27$$

$$\alpha = \frac{200}{31} = 6.45 \quad 1.28$$

Admitindo uma humidade relativa de 80%, e segundo a fórmula seguinte,

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \times (0.3 \times 0.7)}{2 \times 0.3 + 2 \times 0.7} = 210 \text{ mm} \quad 1.29$$

Obteve-se um  $\varphi(\infty, t_0) = 2.3$ .

Estes valores de coeficiente de homogeneização e módulo de elasticidade, são da fase inicial da vida da estrutura, ou seja, podemos afirmar que ainda não ocorreu fluência. No entanto, tem de se realizar uma correção ao coeficiente de fluência obtido para efeitos de cálculo, bem como calcular um novo módulo de elasticidade efetivo, estando remetido para valores de  $t = \infty$ .

Assim, esta correção calcula-se através da seguinte fórmula:

$$\varphi_{ef, \text{carac ou freq}} = \varphi(\infty, t_0) \times \frac{M_{qp}}{M_{\text{carac ou freq}}} \quad 1.30$$

Em suma, com base nos coeficientes de fluência efetivos para cada combinação, é possível estimar os correspondentes módulos de elasticidade efetivos para o betão e assim, o novo coeficiente de homogeneização.

$$\varphi_{ef,carac} = 2.3 \times \frac{243.8}{312.4} = 1.7949 \rightarrow E_{c,eff,carac} = \frac{31}{1 + 1.7949} = 11.09 \text{ GPa} \quad \text{I.31}$$

$$\varphi_{ef,qp} = 2.3 \rightarrow E_{c,eff,qp} = \frac{31}{1 + 2.3} = 9.394 \text{ GPa} \quad \text{I.32}$$

$$\alpha_{ef,carac} = \frac{200}{11.09} = 18.0316 \quad \text{I.33}$$

$$\alpha_{ef,qp} = \frac{200}{9.394} = 21.29 \quad \text{I.34}$$

### Momento fletor de fendilhação

O cálculo de tensões em serviço em peças de betão armado sujeitas à flexão requer o conhecimento do momento de fissuração como condição inicial para estabelecimento das condições de cálculo (em secção fendilhada ou não fendilhada). Assim sendo, e uma vez que à partida não é necessária grande precisão no momento de fendilhação, efetua-se um cálculo simplificado sem homogeneização da secção (considerando apenas a secção resistente de betão)

O estado da secção verifica-se comparando o momento crítico com o momento máximo atuante em cada combinação apresentada anteriormente.

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{I} y \quad \text{I.35}$$

$$2.6 \times 10^6 = \frac{M_{cr}}{\frac{0.3 * 0.7^3}{12}} \times \frac{0.7}{2} \quad \text{I.36}$$

$$M_{cr} = 63.7 \text{ kN.m} \quad \text{I.37}$$

Como  $M_{Ed} > M_{cr}$  a secção encontra-se fendilhada no estado de tensão inicial.

## Limitação das tensões em serviço de acordo com o EC2

Seguindo o Eurocódigo 2 vai-se determinar a limitação das tensões do betão e do aço durante o serviço das estruturas.

- Betão:

A tensão de compressão no betão deve ser limitada a fim de evitar a formação de fendas longitudinais. De acordo com a cláusula 7.2 (3) do Eurocódigo 2, se a tensão no betão na combinação quase-permanente for inferior a  $k_2 \times f_{ck}$  (com  $k_2 = 0.45$ ), pode-se considerar que a fluência é linear.

$$\begin{aligned}\sigma_{c,qp} &\leq k_2 \times f_{ck} \\ \Leftrightarrow \sigma_{c,qp} &\leq 0.45 \times 25 \\ \Leftrightarrow \sigma_{c,qp} &\leq 11.25 \text{ MPa}\end{aligned}\tag{1.38}$$

Deste modo, é importante calcular a tensão na fibra mais comprimida da secção de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_c = \frac{M}{I} \times y\tag{1.39}$$

Neste caso tem-se um momento máximo positivo, para a combinação de ações quase permanente de 243.8 kN.m.

Cálculo da área homogeneizada ( $A_{S(varões)} = 0.001963 \text{ m}^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.001963 \times 6.45 = 0.012661 \text{ m}^2\tag{1.40}$$

Cálculo da área homogeneizada ( $A_{S(varões)} = 0.000628 \text{ m}^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.000628 \times 6.45 = 0.004051 \text{ m}^2\tag{1.41}$$

Equivalência de Momentos Estáticos:

$$\frac{b \times x^2}{2} = A_{s,hom} \times (h - a - x)\tag{1.42}$$

$$\Leftrightarrow \frac{0.3 \times x^2}{2} + 0.004051 \times (x - 0.03) = 0.012661 \times (0.7 - 0.035 - x)\tag{1.43}$$

$$\Leftrightarrow x = 0.189332m$$

Inércia da secção ativa em relação ao eixo neutro:

$$I_{en} = \frac{b \times x^3}{3} + \sum A_{s,hom} \times (d - x)^2 \quad 1.44$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = \frac{0.3 \times 0.189332^3}{3} + 0.012661 \times (0.7 - 0.035 - 0.189332)^2 + 0.004051 \times (0.189332 - 0.03)^2 \quad 1.45$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = 0.003646 m^4$$

A tensão máxima instalada no betão para combinações quase permanentes será então de:

$$\sigma_c = \frac{M_{qp}}{I_{en}} \times y \quad 1.46$$

$$\Leftrightarrow \sigma_c = \frac{243.8}{0.003646} \times 0.189332 = 12.7 MPa \quad 1.47$$

$$\Leftrightarrow \sigma_c = 12.7 MPa < 11.25 MPa$$

- Aço:

A outra limitação de tensão em serviço prevista no EC2 que é aplicável ao presente caso corresponde à armadura, estando indicada em 7.2(5): “Para o aspeto poderá considerar-se que um nível de fendilhação ou deformação inaceitável é evitado se, sob a combinação característica de ações, a tensão de tração na armadura não exceder  $k_3 \cdot f_{yk}$  (com  $k_3=0.8$ )”.

Conforme indicado anteriormente, o instante mais condicionante para verificação de tensões em armaduras é o tempo infinito, pelo que para a combinação característica se adotará  $\alpha=18.0316$ . O momento fletor atuante a considerar é de 312.4 kN.m.

Área de aço homogeneizada em betão ( $A_{s(varões)} = 0.001963 m^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.001963 \times 18.0316 = 0.035396 m^2 \quad 1.48$$

Área de aço homogeneizada em betão ( $A_{s(varões)} = 0.000628 m^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.000628 \times 18.0316 = 0.011324m^2 \quad 1.49$$

Equivalência de Momentos Estáticos:

$$\frac{b \times x^2}{2} = A_{s,hom} \times (h - a - x) \quad 1.50$$

$$\Leftrightarrow \frac{0.3 \times x^2}{2} + 0.011324 \times (x - 0.03) = 0.035396 \times (0.7 - 0.035 - x) \quad 1.51$$

$$\Leftrightarrow x = 0.272566$$

Determinação da inércia da secção ativa em relação ao eixo neutro (desprezando simplifcadamente a inércia “local” dos varões de aço):

$$I_{en} = \frac{b \times x^3}{3} + \sum A_{s,hom} \times (d - x)^2 \quad 1.52$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = \frac{0.3 \times 0.272566^3}{3} + 0.035396 \times (0.7 - 0.035 - 0.272566)^2 + 0.011324 \times (0.7 - 0.003 - 0.272566)^2 \quad 1.53$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = 0.009516 m^4 \quad 1.54$$

A tensão máxima instalada no aço para a combinação característica será então de:

$$\sigma_s = \alpha \frac{M_{caract}}{I_{en}} \times y \quad 1.55$$

$$\Leftrightarrow \sigma_s = 18.0316 * \frac{312.4}{0.009516} \times (0.7 - 0.035 - 0.272566) = 232.3MPa \quad 1.56$$

$$\Leftrightarrow \sigma_s = 232.3 MPa < 0.8 \times 400 = 320 MPa \quad 1.57$$

Conclui-se que a verificação das tensões de acordo com o EC2 está cumprida.

### Controlo de fendilhação sem cálculo direto

Cálculo do  $Y_g$ :

$$= \frac{0.3 * 0.7 * 0.35 + 6.45 \times 0.001963 \times 0.035 + 6.45 \times 0.000628 \times (0.7 - 0.03)}{0.3 * 0.7 + 0.001963 \times 6.45 + 0.000628 \times 6.45} \quad \text{I.58}$$

$$= 0.338125 \text{ m} \quad \text{I.59}$$

$$A_{ct} = 0.3 \times 0.338125 = 0.101438 \text{ m}^2 \quad \text{I.60}$$

$$d = 0.7 - 0.035 = 0.665 \text{ m} \quad \text{I.61}$$

$$K_c = 0.4 \quad \text{I.61}$$

$$\sigma_s = \sigma'_s \times \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \times \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad \text{I.63}$$

$$\sigma_s = \sigma'_s \times \frac{2.6}{2.9} \times \frac{0.4 \times 0.35}{2(0.7 - 0.665)} = \sigma'_s \times 1.7931 \quad \text{I.64}$$

Como os varões da camada inferior são  $\emptyset 25$ , a tensão máxima admissível obtém-se através de uma interpolação da tabela de tensão limite.

A altura da secção é 700 mm, pelo que o valor de k para aplicar à expressão 7.1 do EC 2 é também obtido por interpolação entre 1 (almas com 300mm ou menos) e 0.65 (almas com 800 mm ou mais), obtemos um  $k=0.72$ .

Podemos aplicar agora, a expressão 7.1 do EC 2 para a determinação da área mínima de armadura de fendilhação.

$$A_{s,min} \times \sigma_s = k \times k_c \times f_{ct,eff} \times A_{ct} \quad \text{I.65}$$

$$A_{s,min} \times 259.8 = 0.4 \times 0.72 \times 2.6 \times 0.101438 = 0.00038 \text{ m}^2 \quad \text{I.66}$$

$$A_{s,min} = 2.92 \text{ cm}^2 < 19.63 \text{ cm}^2 \text{ (Armadura adoptada)} \quad \text{I.67}$$

Procede-se também ao controlo da fendilhação sem cálculo direto de acordo com 7.3.3 (EC2).

Segundo 7.3.3(2), para fendas provocadas predominantemente por ações, o controlo da fendilhação sem cálculo direto pode ser efetuado por satisfação das disposições do Quadro 7.2N ou do Quadro 7.3N. Para aplicação do Quadro 7.2N ou 7.3N do EC2 é necessário o conhecimento da tensão na armadura na combinação apropriada (neste caso a quase permanente). No entanto, enquanto a armadura mínima de fendilhação foi calculada tendo em vista o comportamento aquando da formação da primeira fenda, o controlo da fendilhação diz respeito à situação mais desfavorável para a formação de fendas que corresponde ao longo prazo. Nesse sentido será necessário proceder ao cálculo da tensão instalada nas armaduras no longo prazo, utilizando para isso um coeficiente de homogeneização de  $\alpha = 21.29$  (em correspondência com a combinação quase permanente).

Procedimento de cálculo das tensões em serviço no aço:

Área de aço homogeneizada em betão ( $A_{s(varões)} = 0.001963 \text{ m}^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.001963 \times 21.29 = 0.0418 \text{ m}^2 \quad 1.67$$

Área de aço homogeneizada em betão ( $A_{s(varões)} = 0.000628 \text{ m}^2$ ):

$$A_{s,hom} = A_s \times \alpha \Leftrightarrow A_{s,hom} = 0.000628 \times 21.29 = 0.01337 \text{ m}^2 \quad 1.68$$

Equivalência de Momentos Estáticos:

$$\frac{b \times x^2}{2} = A_{s,hom} \times (h - a - x) \quad 1.69$$

$$\Leftrightarrow \frac{0.3 \times x^2}{2} + 0.01337 \times (x - 0.03) = 0.0418 \times (0.7 - 0.035 - x) \quad 1.70$$

$$\Leftrightarrow x = 0.287063 \text{ m} \quad 1.71$$

Determinação da inércia da secção ativa em relação ao eixo neutro (desprezando simplifcadamente a inércia “local” dos varões de aço):

$$I_{en} = \frac{b \times x^3}{3} + \sum A_{s,hom} \times (d - x)^2 \quad 1.73$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = \frac{0.3 \times 0.287063^3}{3} + 0.0418 \times (0.7 - 0.035 - 0.287063)^2 + 0.01337 \times (0.287063 - 0.03)^2 \quad 1.74$$

$$\Leftrightarrow I_{en} = 0.00922 \text{ m}^4 \quad 1.75$$

A tensão máxima instalada no aço para a combinação quase permanente será então de:

$$\sigma_s = \alpha \frac{M_{qp}}{I_{en}} \times y \quad 1.76$$

$$\Leftrightarrow \sigma_s = 21.29 * \frac{243.8}{0.00922} \times (0.7 - 0.035 - 0.287063) = 212.8 \text{ MPa} \quad 1.77$$

### Controlo da deformação

De acordo com o EC2 (7.4.1(6)), uma das alternativas para verificar o estado limite de deformação poderá ser a limitação da relação vão/altura de acordo com 7.4.2. De referir que a combinação relevante para verificação da deformação é a quase permanente.

Calcula-se inicialmente a taxa de armaduras no vão em estudo:

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.001963 + 0.000628}{0.3 \times 0.665} = 0.012987 \quad 1.78$$

$$\rho_0 = 10^{-3} \times \sqrt{f_{ck}} = 10^{-3} \times \sqrt{25} = 0.005 \quad 1.79$$

Como  $\rho > \rho_0$ , utiliza-se a expressão 7.16b do EC 2, temos:

$$\frac{l}{d} = K \left[ 11 + 1.5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \frac{310}{\sigma_s} \quad 1.80$$

$$\frac{l}{d} = 1.0 \left[ 11 + 1.5\sqrt{25} \frac{0.005}{0.012987} + 0 \right] \frac{310}{212.8} \quad 1.81$$

$$\frac{l}{d} = 20.23 \quad 1.82$$

$$\frac{l}{d} = \frac{7}{0.665} = 10.53 < 20.23 \quad 1.83$$

Conclui-se que é verificado o estado limite de deformação.